

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Odhad teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy pomocí simulace v
software Witness**

**Runway theoretical capacity estimation based on simulation in software
Witness**

Student:

Lucie Adamusová

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání bakalářské práce

Student: **Lucie Adamusová**

Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor: 3708R037 Technologie provozu letecké techniky

Téma: Odhad teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy pomocí simulace v software Witness
Runway Theoretical Capacity Estimation Based on Simulation in Software Witness

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Cílem závěrečné práce je v simulačním software Witness vytvořit simulační model vzletové a přistávací dráhy a na základě experimentů s tímto modelem odhadnout teoretickou kapacitu vzletové a přistávací dráhy. Experimenty budou dále zaměřeny na sledování vlivu použitého pravděpodobnostního rozdělení časových veličin modelu na hodnotu kapacity.

Předpokládaná osnova práce:

1. Úvod.
2. Charakteristika modelovaného procesu – nastavení výchozích podmínek.
3. Simulace a simulační software Witness.
4. Popis vytvořeného simulačního modelu.
5. Vyhodnocení simulačních experimentů.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

HAVEL, K., KULČÁK, L.: *Řízení letové provozu*. Bratislava: ALFA, 1990. ISBN 80-05-00401-X.
Letecké předpisy L.
Manuály k simulačnímu software Witness..

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



prof. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Řepištích18.5.2020.....


.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Řepištích 18. 5. 2020



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: LUCIE ADAMUSOVÁ

Adresa trvalého pobytu autora práce: DOLNÍ 329, ŘEPIŠTĚ 739 32

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ADAMUSOVÁ, L. *Odhad teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy pomocí simulace v software Witness: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Technologie letecké dopravy, 2020, 55 s. Vedoucí práce: Dorda, M.

Bakalářská práce se zabývá odhadem teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy. Pro řešení této problematiky byl zvolen simulační software Witness. První část práce se věnuje charakteristice procesu vzletu a přistání, včetně popsání jednotlivých rozstupů mezi letouny. Další část práce je zaměřena na teorii softwaru Witness, ve kterém je vytvořen simulační model. V simulačním modelu byly vytvořeny experimenty. Výsledky experimentů jsou zpracovány do tabulek a grafů a jsou porovnány s výsledky obsaženými v bakalářské práci obhajované v akademickém roce 2016/2017.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

ADAMUSOVÁ, L. *Runway theoretical capacity estimation based on simulation in software Witness: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Air Transport Technology, 2020, 55 p. Thesis head: Dorda, M.

The bachelor thesis deals with the estimation of the theoretical capacity of the runway. Simulation software Witness was chosen as a method of solving this issue. The first part deals with the characteristics of the take-off and landing process, including the aircraft separations. The next part of the thesis is focused on the theory of simulation software Witness, in which the simulation model is created. In this model were created experiments, which results are processed into tables and graphs. Results were compared with the results contained in the bachelor thesis defended in the academic year 2016/2017.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
1 ÚVOD	11
2 CHARAKTERISTIKA VZLETOVÉ A PŘISTÁVACÍ DRÁHY	12
2.1 DÉLKA VZLETOVÉ A PŘISTÁVACÍ DRÁHY	12
2.2 POVRCH VZLETOVÉ A PŘISTÁVACÍ DRÁHY	13
2.3 VZLET A PŘISTÁNÍ	15
2.3.1 VZLET	15
2.3.2 PŘISTÁNÍ	16
2.4 ROZSTUPY MEZI LETOUNY	17
2.4.1 VERTIKÁLNÍ ROZSTUPY	17
2.4.2 ROZSTUPY MEZI VYČKÁVAJÍCÍMI LETOUNY	18
2.4.3 MINIMÁLNÍ ROZSTUPY MEZI ODLÉTÁVAJÍCÍMI LETOUNY	18
2.4.4 ROZSTUPY PŘI TURBULENCI V ÚPLAVU	19
2.4.5 NOUZOVÉ ROZSTUPY MEZI LETOUNY	19
2.5 PROTISRÁŽKOVÝ SYSTÉM TCAS	20
3 SIMULACE A SIMULAČNÍ SOFTWARE WITNESS.....	22
3.1 PROSTŘEDÍ SIMULAČNÍHO SOFTWARE WITNESS.....	22
3.2 ZÁKLADNÍ PRVKY PRO TVORBU SIMULACE.....	23
3.3 NASTAVENÍ PRVKŮ SIMULAČNÍHO MODELLU	24
3.4 VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ PRAVIDLA V SOFTWARE WITNESS.....	27
3.4.1 ZÁKLADNÍ PRAVIDLA.....	27
3.4.2 ZÁKLADNÍ FUNKCE.....	28
4 TVORBA SIMULAČNÍHO MODELU	29
4.1 ZÁPIS HODNOT DO MICROSOFT EXCEL	35
4.2 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VSTUPNÍCH DAT	36

4.3	TVORBA EXPERIMENTU	43
5	VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ	45
5.1	POUŽITÍ WARMUP PERIODY	48
5.2	VSTUPNÍ PRAVIDLO LEAST FREE	49
5.3	VÝVOJ PRŮMĚRNÉHO POČTU ČEKAJÍCÍCH LETOUNŮ V ČASE.....	51
6	ZÁVĚR.....	52
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	55
	SEZNAM PŘÍLOH.....	57

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AIP	Aeronautical information publication	Letecká informační příručka	
ASDA	Accelerate–stop distance available	Použitelná délka přerušného vzletu	
ASP	Asphalt	Asfalt	
ATS	Letové provozní služby	Air traffic services	
CON	Concrete	Beton	
CWY	Clearway	Předpolí	
EFIS	Electronic Flight Information System	Elektronický letový informační systém	
<i>EL</i>		Střední počet zákazníků ve frontě	[-]
<i>EW</i>		Střední doba čekání ve frontě	[s]
<i>EX</i>		Střední hodnota	[s]
FL	Flight level	Letová hladina	
ft	Feet	Stopa	
<i>h</i>		Šířka třídy	[s]
IFR	Instrument flight rules	Pravidla pro let podle přístrojů	
<i>k</i>		Počet tříd	[-]
LDA	Landing distance available	Použitelná délka pro přistání	
MTOW	Maximum take–off weight	Maximální vzletová hmotnost	
<i>n</i>		Počet prvků	[-]
RA	Resolution advisory	Rada k vyhnutí	
RWY	Runway	Dráha	
SEM	Standard error of the mean	Chyba střední hodnoty	[s]
SWY	Stopway	Dojezdová dráha	
TA	Traffic advisory	Upozornění na provoz	

TCAS	Traffic alert and collision avoidance systém	Provozní výstražný protisrážkový systém	
TODA	Take-off distance available	Použitelná délka vzletu	
TORA	Take-off run available	Použitelná délka rozjezdu	
ÚCL		Úřad civilního letectví	
v_{max}		Maximální varianta proměnné	[s]
v_{min}		Minimální varianta proměnné	[s]
λ		Intenzita vstupního toku	[letoun/h]
μ		Parametr obsluhy	[letoun/h]
ρ		Intenzita provozu	[-]
σ		Směrodatná odchylka	[s]
\bar{x}		Průměrná hodnota	[s]

1 ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je určit, jaké hodnoty nabývá maximální teoretická kapacita vzletové a přistávací dráhy. Tato kapacita bude určena na základě simulačních experimentů provedených v simulačním softwaru Witness. Výsledné hodnoty dosažené simulačními experimenty budou srovnány s analytickými výsledky obsaženými v bakalářské práci Ing. Matouška obhajované v akademickém roce 2016/17 [1].

Bakalářská práce je členěna do šesti kapitol. Druhá kapitola se zaměřuje na charakteristiku procesu vzletu a přistání. Je zde popsán povrch vzletové a přistávací dráhy, jednotlivé fáze vzletu a přistání a jednotlivé rozstupy mezi letouny. V neposlední řadě je zde popsán protisrážkový systém, který je především důležitý z hlediska bezpečnosti letu, stejně tak jako předchozí zmíněné faktory.

Třetí kapitola je zaměřena na popis simulačního softwaru Witness. Dále jsou zde vysvětleny základní funkce a pravidla tohoto softwaru, jejichž znalost je nedílnou součástí ve tvorbě simulačního modelu.

Čtvrtá část práce se věnuje tvorbě samotného simulačního modelu, jsou zde vysvětleny jednotlivé postupy a naměřená data jsou statisticky zpracována. Po analýze těchto dat následuje tvorba simulačních experimentů.

Pátá kapitola se zaměřuje na výsledky simulačních experimentů a jejich srovnání s analytickými daty naměřenými Ing. Matouškem [1]. Vypočtené číselné charakteristiky jsou znázorněny pomocí grafů a tabulek.

2 CHARAKTERISTIKA VZLETOVÉ A PŘISTÁVACÍ DRÁHY

Vzletová a přistávací dráha, v anglické terminologii řečeno „runway“ je nedílným prvkem každého letiště. Odehrávají se zde nejkritičtější fáze letu, kterými jsou vzlet a přistání.

Vzletová a přistávací dráha je považována za zásadní orientační element při konečném přiblížení letounu. Při přiblížení mají velký vliv na bezpečnost prvky, kterými jsou technické parametry vzletové a přistávací dráhy, meteorologické vlivy a zkušenosti pilota. Důležitým aspektem na viditelnost a rozpoznatelnost dráhy je povrch dráhy, délka, šířka a v neposlední řadě její značení.

Značení vzletové a přistávací dráhy je striktně dáno předpisem L-14 (Letiště), který udává, že dráha musí být označena zeměpisným směrníkem, jenž se skládá ze dvou číslic, případně i písmena, pokud jsou umístěny dvě dráhy rovnoběžně. Jedním z hledisek rozpoznatelnosti dráhy je označení osy, což v praxi bývají střídající se bílé pruhy s mezerami. Dále se jedná o prahové značení, u kterého bílé pruhy sestávají v podélném směru dráhy a jejich počet je určen šířkou dráhy, jak je zřejmé z Tabulky č.1 [2].

Tabulka 1 – Šířka vzletové a přistávací dráhy [2, úprava autor]

Šířka RWY	8 m	23 m	30 m	45 m	60 m
Počet pruhů	4	6	8	12	16

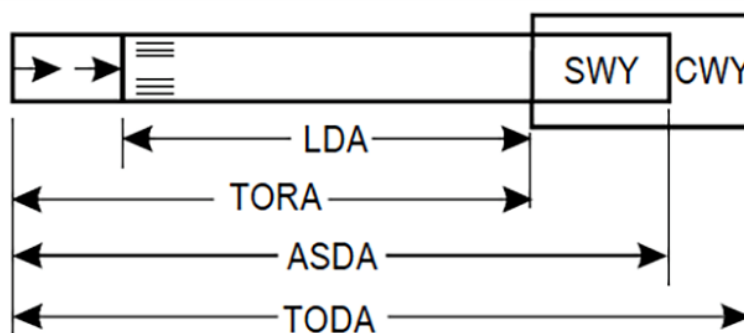
2.1 DÉLKA VZLETOVÉ A PŘISTÁVACÍ DRÁHY

Na všech letištích mají vzletové a přistávací dráhy předpisem pevně stanovené rozměry, které musí být zveřejněny s přesností na metry nebo stopy. Vyhlášené rozměry drah nalezneme ve veřejně přístupné letecké informační příručce (AIP) pro každé letiště. Rozměry drah jsou nejenom pro piloty stěžejní při volbě letiště přistání. Ne všechna letiště jsou totiž schopna pojmout letouny s rozpětím křídel 80 m, které má například doposud největší dopravní letoun společnosti Airbus A380. Z tohoto důvodu existují takzvané vyhlášené provozní délky drah, které nám stanovují, zda-li je daný letoun schopen vzletu nebo přistání na daném letišti [3].

„Vyhlášené délky, které mají být vypočteny pro každý směr RWY, zahrnují: použitelnou délku rozjezdu (TORA), použitelnou délku vzletu (TODA), použitelnou délku přerušného vzletu (ASDA) a použitelnou délku přistání (LDA).” [4]

Předpisem jsou dány 4 základní vyhlášené provozní délky drah (Obrázek č.1):

- 1) **Použitelná délka rozjezdu – TORA** (take-off run available) musí být vždy rovna nebo větší než délka rozjezdu, na jejímž konci je nezbytné, aby se letoun odpoutal od dráhy.
- 2) **Použitelná délka vzletu – TODA** (take-off run available) je použitelná délka rozjezdu letounu a k ní připočteno předpolí (CWY), pokud je na daném letišti k dispozici. Nejpozději na konci použitelné délky vzletu je letoun povinen vzlétnout do stanovené výšky 15 nebo 25 metrů.
- 3) **Použitelná délka přerušného vzletu – ASDA** (accelerate-stop distance available) je rovna použitelné délce rozjezdu zvětšená o délku dojezdové dráhy (SWY), pokud je vybudována.
- 4) **Použitelná délka přistání – LDA** (landing distance available) je použitelná pro dosednutí a přistání letounu. [1]



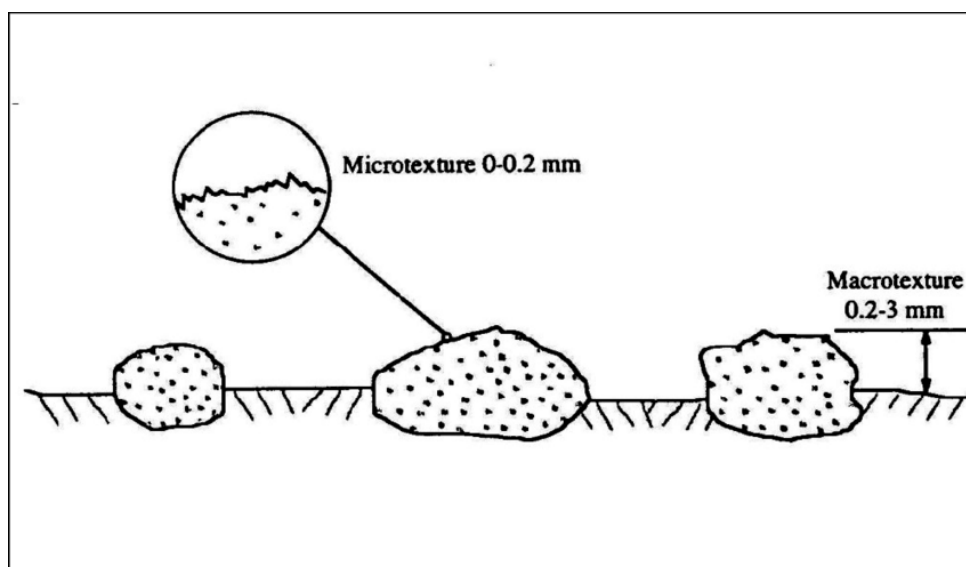
Obrázek č.1 – Vyhlášené provozní délky drah [4]

2.2 POVRCH VZLETOVÉ A PŘISTÁVACÍ DRÁHY

Z důvodu omezení nepříznivých vlivů na samotný proces vzletu a přistání je žádoucí, aby povrch vzletové a přistávací dráhy odpovídal určitým stanovám. V první řadě musí být povrch dráhy bez jakýchkoli nerovností, které by negativně mohly ovlivnit tření pneumatik letounu a případně by mohly způsobit nadměrné nadskakování letounu, kymácení a další

problémy při ovladatelnosti a řízení letounu. Dále je potřeba, aby brzdná dráha letounu byla co nejkratší, což znamená vysoké tření povrchu vzletové a přistávací dráhy s povrchem pneumatik i v případě, že dráha bude mokrá. S pomocí mikrotextury a makrotextury povrchu vzletové a přistávací dráhy vzrůstá koeficient tření mezi povrchem dráhy a povrchem pneumatik letounu.

Makrotextura (*Obrázek č. 2*) je takzvaná viditelná drsnost povrchu, která umožňuje odvádět vodu z pneumatik letounu. Rozsah vertikální amplitudy se pohybuje přibližně v rozmezí od 0,2 mm do 3 mm, jak můžeme názorně vidět na obrázku č. 2. V případě, že voda z povrchu dráhy nebude dobře odvedena, může nastat jev zvaný aquaplaning, který podporují faktory, jako jsou vyšší rychlost, snížená hloubka dezénu a vyšší sloupec vody na dráze. Druhým typem je již zmiňovaná mikrotextura (*Obrázek č. 2*), což je samotný povrch jednotlivých kamenů. Mikrotextura není tak dobře rozeznatelná pouhým okem, přestože je považována za hlavní ochranný prvek zabráňující smyku na mokrém povrchu dráhy při malé rychlosti letounu. Rozsah je znatelně menší oproti makrotextuře, vertikální amplituda má hodnotu do 0,2 mm.



Obrázek č. 2 – Makrotextura a mikrotextura povrchu [7]

Existují dva typy povrchů vzletové a přistávací dráhy, zpevněný a nezpevněný. Zpevněný povrch, jako je například asfalt, nalezneme převážně na řízených letištích. Povrch nezpevněný, zpravidla tráva, se vyskytuje na letištích neřízených. Ale nemusí to být vždy pravidlem. Obecně nejčastějším typem povrchů užívaných na výstavbu zpevněné vzletové a přistávací dráhy bývá asfalt (ASP), beton (CON) a asfaltobeton [5] [6] [8].

2.3 VZLET A PŘISTÁNÍ

Jak fáze vzletu, tak i fáze přistání jsou nedílnými součástmi každého úspěšného letu. Z pilotního hlediska se jedná o nejdůležitější a technicky nejsložitější manévry. I přes fakt, že mnoho dopravních letounů umí létat na autopilota, při vzletu a přistání je velice důležitá manuální pilotáž a nasazení pilota. Oba manévry můžeme rozdělit na pozemní část a vzdušnou část [9].

2.3.1 VZLET

Vzlet je část letu, která začíná pohybem letounu na vzletové dráze, letoun se nejprve rozjíždí, následně se odpoutává od povrchu dráhy a stoupá až do smluvené výšky nad letištěm nebo nad vodní hladinou.

Proces vzletu můžeme rozdělit do pěti částí, které vidíme na Obrázku č. 3:



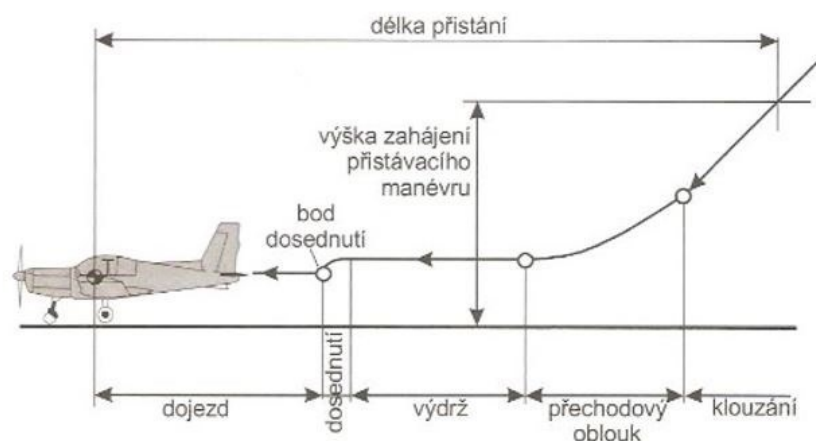
Obrázek č.3 – Fáze vzletu [9]

- 1) **Rozjezd** je prvotní část vzletu, během které letoun nabírá potřebnou rychlost k odpoutání.
- 2) **Odpoutání** je daný bod, ve kterém dochází k odpoutání letounu od povrchu vzletové dráhy.
- 3) Při **rozletu** se letoun letící velmi nízko u země snaží akcelarovat na rychlost, která je potřebná pro dostatečné stoupání.
- 4) Během **přechodové fáze** (tzv. přechodový oblouk) nastává ustálení rychlosti.
- 5) **Stoupání** je konečnou fází vzletu, během které letoun zatahuje podvozek, rychlost je konstantní. Tato část vzletu končí v již zmiňované smluvené výšce.

Těchto pět fází vzletu není nezbytných, u některých letounů může docházet z důvodu velkého výkonu k vynechání fáze rozletu a přechodového oblouku, letoun v těchto případech po odpoutání rovnou přechází do fáze stoupání.

2.3.2 PŘISTÁNÍ

Přistání je poslední fází letu, při které letoun snižuje svou výšku i rychlost a dosedává na zem, přistání končí úplným zastavením letounu. Jedná se o nejnáročnější manévry celého letu. Úspěšné přistání může ovlivnit mnoho faktorů, jako je úhel klesání, správná koordinace s řízením letového provozu a vhodně upravená rychlost. Rychlost v přistávací konfiguraci je rovna 1,3násobku pádové rychlosti. Například u letounu Boeing 737-700 je pádová rychlost rovna 108 knotům (200 km/h) a jeho přistávací rychlost je rovna 140 knotům (260 km/h). Na následujícím Obrázku č. 4 můžeme vidět 5 fází přistání:



Obrázek č.4 – Fáze přistání [9]

- 1) První fází přistání je **klouzání**, při které letoun snižuje svou výšku, má vysunutý podvozek a vztlakové klapky.
- 2) V přechodové fázi (**přechodový oblouk**) letoun letí při volnoběžných otáčkách motoru a přechází z klouzavého letu do letu vodorovného.
- 3) **Výdrž** je fáze přistání, při které letoun letí přímočaře velmi těsně nad zemí, provádí se to z důvodu snižování rychlosti. Během této fáze dochází ke zvyšování úhlu náběhu z důvodu snižování rychlosti až na rychlost dosednutí, jedná se o tzv. podrovnání.
- 4) V bodě **dosednutí** se letoun poprvé od vzletu dotkne povrchu přistávací dráhy.

- 5) **Dojezd** je poslední částí přistání, během které letoun zpomaluje až do úplného zastavení.

2.4 ROZSTUPY MEZI LETOUNY

Minimální rozstupy mezi letouny jsou stanoveny předpisem L4444 – POSTUPY PRO LETOVÉ NAVIGAČNÍ SLUŽBY. Tyto rozstupy musí být jak pilotem, tak personálem řízení letového provozu striktně dodržovány, aby se předešlo případným srážkám a kolizím mezi letouny. V případě bezpilotních letounů (např. dronů) nejsou tyto minimální bezpečné vzdálenosti uvedeny v předpisu, jsou řešeny individuální formou provozních podmínek. Bezpečné rozstupy by měly být dodržovány jak horizontálně, tak vertikálně a jsou dány časovým intervalem nebo určitou vzdáleností. Z důvodu zamezení střetu letounů bývají na palubách zavedeny protisrážkové systémy jako je například TCAS (Traffic Collision Avoidance Systém – Palubní protisrážkový systém) [10].

2.4.1 VERTIKÁLNÍ ROZSTUPY

Minimálních vertikálních rozstupů mezi letouny je dosaženo pomocí správného nastavení výškoměru. Tímto se splňuje požadavek, aby letouny létaly v různých nadmořských výškách a letových hladinách. Předpisy určují následující vertikální separaci:

- Pod FL290 (letová hladina 290) – separace 300 m (1000 ft)
- Nad FL290 (letová hladina 290) – separace 600 m (2000 ft)

Výjimkou jsou situace, kdy jsou dodržována redukovaná vertikální separační minima (RVSM). Redukovaná separační minima téměř zdvojnásobují kapacitu vzdušného prostoru a umožňují letounům létat optimální profil tratě, a tak i snížit spotřebu paliva, čímž se let stává ekonomičtější. Redukovaná vertikální separační minima jsou následující:

- Pod FL410 (letová hladina 410) – separace 300 m (1000 ft)
- Nad FL410 (letová hladina 410) – separace 600 m (2000 ft)

2.4.2 ROZSTUPY MEZI VYČKÁVAJÍCÍMI LETOUNY

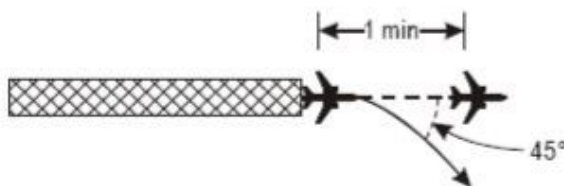
Za podmínky, že příslušné stanoviště letových provozních služeb (ATS) nezajistí příčný rozstup mezi letouny, je nezbytně nutné, aby byl dodržován vertikální rozstup mezi letouny letící v sousedních vyčkávacích obrazcích.

„S výjimkou, kdy je zajištěn příčný rozstup, musí být mezi letadly vyčkávajícími za letu a ostatními letadly přilétávajícími, odlétávajícími nebo na trati zajištěn vertikální rozstup, kdykoli jsou letadla, kterých se to týká, ve vzdálenosti do 5 minut letu od vyčkávacího prostoru nebo ve vzdálenosti předepsané příslušným úřadem civilního letectví (ÚCL).” [10]

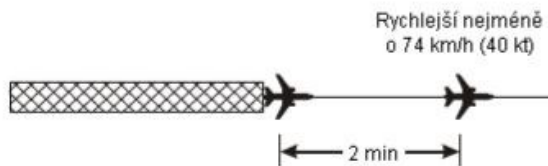
2.4.3 MINIMÁLNÍ ROZSTUPY MEZI ODLÉTÁVAJÍCÍMI LETOUNY

Předpis stanovuje následující minima:

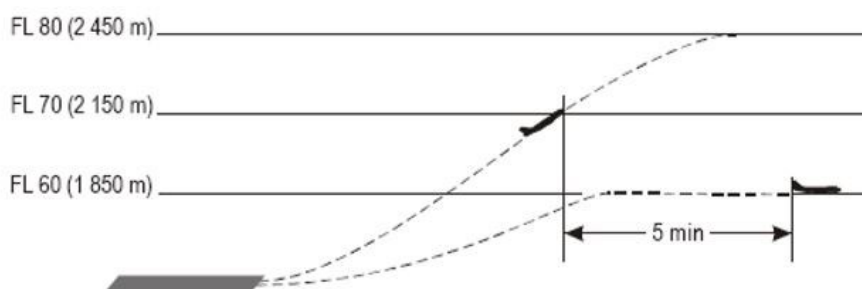
- Pro letouny letící po tratích, které se rozbíhají o 45 stupňů ihned po vzletu tak, aby byl zajištěn příčný rozstup – rozstup mezi vzlety 1 minuta. Používá se při vzletech z paralelních vzletových drah (Obrázek č. 5).
- Pro letouny letící po shodných tratích v případě, že je první letoun alespoň o 74 km/h rychlejší než druhý vzlétající letoun – rozstup mezi vzlety 2 minuty (Obrázek č. 6).
- Pro letouny letící po shodných tratích v situacích, kdy není dodržen vertikální rozstup a odlétávající letoun protne letovou hladinu letounu vpředu – rozstup 5 minut mezi vzlety (Obrázek č. 7).



Obrázek č. 5 – 1 minutový rozstup mezi odlétávajícími letouny [10]



Obrázek č. 6 – 2 minutový rozstup mezi odlétávajícími letouny [10]



Obrázek č.. 7 – 5 minutový rozstup mezi odlétávajícími letouny [10]

2.4.4 ROZSTUPY PŘI TURBULENCI V ÚPLAVU

Rozstupy mezi letouny při turbulenci v úplavu byly zavedeny především z důvodu bezpečnosti. Letouny s nižší vzletovou hmotností vzletávající za letouny s vyšší vzletovou hmotností by mohly být při vzletu nebo samotném letu ohroženy ofukováním úplavu, který vzniká důsledkem cirkulace vzduchu na koncích křídel. Z tohoto důvodu letouny rozdělujeme do několika kategorií dle jejich vzletové hmotnosti (MTOW).

2.4.5 NOUZOVÉ ROZSTUPY MEZI LETOUNY

V některých případech nouzových situací není z technického hlediska možné dodržovat předpisem stanovené horizontální rozstupy, a tak se přistupuje k nouzovému vertikálním rozstupům, které jsou zredukované na polovinu:

- 150 m (500 ft) mezi letouny letícími v prostoru, kde se používá minimální vertikální rozstup 300 m (1000 ft).

- 300 m (1000 ft) mezi letouny letícími v prostoru, kde se za běžných podmínek používá minimální vertikální rozstup 600 m (2000 ft).

Pokud je letoun nucen použít nouzové minimální rozstupy, posádka i stanoviště řídicí letového provozu musí být o této situaci informována. Dále musí být posádka informována o okolním provozu.

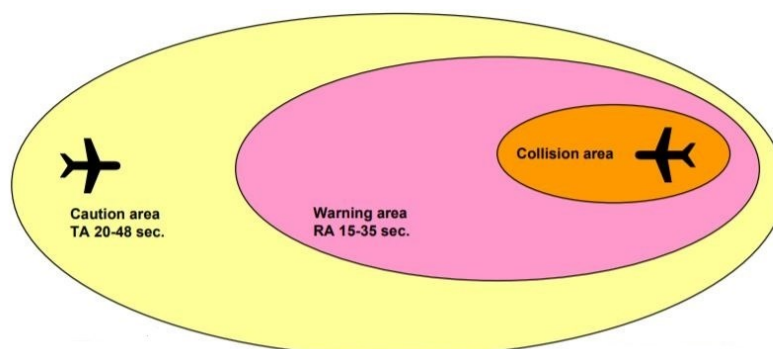
2.5 PROTISRÁŽKOVÝ SYSTÉM TCAS

S aktuálním trendem stále přibývajících letových linek vzrůstá hustota leteckého provozu v oblastech letových tratí, čímž se zvyšuje vytíženost vzdušného prostoru a tím klesá i jeho bezpečnost. V mnoha případech hrozí sblížení nebo přímo srážka dvou letounů. Z důvodu zajištění bezpečnosti jsou letouny vybavovány protisrážkovými systémy, které piloty upozorňují na potencionální nebezpeční kolize.

TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System) je bezpečnostní protisrážkový systém, který posádku letounu informuje o dvou druzích nebezpečí:

- TA (Traffic Advisory) – informace podaná posádce o možné hrozbě.
- RA (Resolution Advisory) – doporučení podané posádce o nějakém manévru ve snaze vyhnout se vzniklé hrozbě, může být pouze preventivní nebo korektivní.

Prostor kolem letounu můžeme rozdělit do 3 zón v závislosti na časovém rozmezí, jak vidíme na Obrázku č.8. TA informace TCAS generuje 20 až 48 sekund před okamžikem těsného přiblížení, informace o RA provozu jsou generovány 15 až 35 sekund před těsným přiblížením.



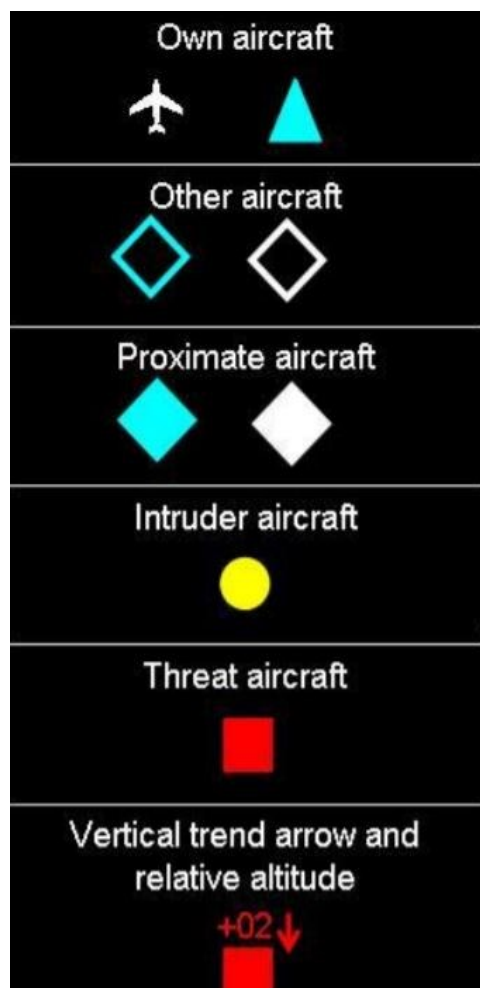
Obrázek č. 8 - Časové rozmezí TCAS [11]

(Traffic Collision Avoidance Systém – Palubní protisrážkový systém)

Systém piloty varuje prostřednictvím různých symbolů zobrazovaných na palubních obrazovkách, nebo doporučují pilotům korektivní zásahy do řízení skrze zvukové pokyny. TCAS je nezávislý na pozemních navigačních systémech a na autopilotovi, i přesto komunikuje s pozemními stanicemi a generuje informace o letovém provozu.

V dnešní době mají všechny komerční letouny povinnost být vybaveny odpovídačem v módu S, který řídícím letového provozu podává informace o poloze a výšce letounu, jeho identifikaci, rychlosti a směrovém kurzu. TCAS snímá okolní vzdušný prostor horizontálně v rádiu 14 námořních mil (22,5 km) a v oblastech zvýšené hustoty provozu může být tento dosah redukován na 5 námořních mil (8 km), systém detekuje informace o ostatních letounech, které jsou vybaveny taktéž odpovídačem v módu S. Systém je omezen kapacitou sledovat nejvýše 30 letounů zároveň.

Výstupní data TCAS mohou být zobrazována na dvou typech displejů, na jednoúčelovém displeji systému TCAS nebo prostřednictvím navigačního displeje EFIS (Electronic Flight Instrument System). Používanou symboliku vidíme na Obrázku č.9:



Obrázek č. 9 - Signalizace TCAS [11]

- Symbol trojúhelníku nebo letadla signalizuje samotný letoun.
- Symbol prázdného kosočtverce signalizuje ostatní letouny nepředstavující nebezpečí
- Symbol plného kosočtverce signalizuje letoun letící v okolí 6 námořních mil (9,66 km) horizontálně a přibližně 1200 stop (366 m) vertikálně.
- Symbol plného žlutého kruhu sděluje informaci o narušiteli daného vzdušného prostoru, TCAS zvukově varuje pilota prostřednictvím TA (Traffic Advisory).
- Symbol plného červeného čtverce posádce hlásí informace o možné kolizi a následně podává RA (Resolution Advisory).
- Směrová šipka a údaj o výšce sděluje výšku letounu vzhledem k vlastní výšce a šipka označuje, zda-li daný letoun stoupá či klesá (+02 indikuje 200 stop, šipka se zobrazuje v případě, že daný letoun má vertikální rychlost vyšší než 500 ft/min) [11].

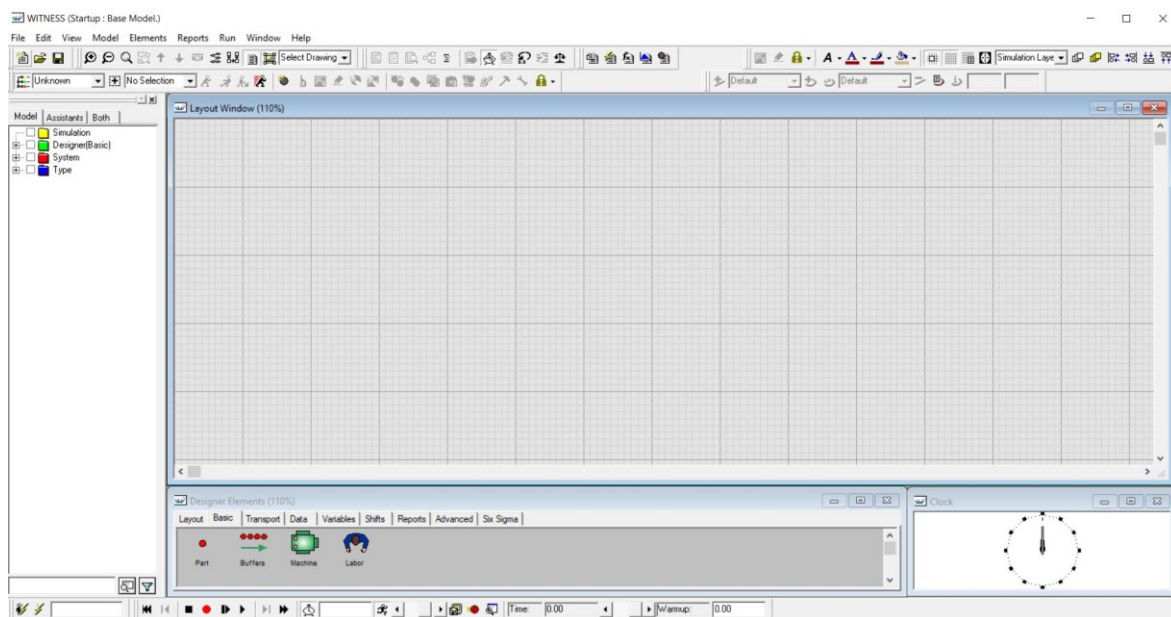
3 SIMULACE A SIMULAČNÍ SOFTWARE WITNESS

Simulace provedené pomocí počítačových modelů a simulačních softwarů mohou v dnešní době velice usnadnit vývoj různých výrobních linek, dovedou předvídat chování dopravních systémů nebo mohou být ekonomicky výhodné pro tvorbu a návrh nových systémů, které doposud nebyly postaveny.

Simulační software Witness se používá především pro optimalizaci výrobních nebo logistických systémů, prostředí podniků a používá se pro simulace. Software je schopen namodelovat různé situace a vyvodit jejich důsledky. Během simulace se provádí množství experimentů, jejichž výsledky mohou záviset na pravděpodobnostním rozdělení, číselných charakteristikách nebo na druhu zvolených prvků [12] [13].

3.1 PROSTŘEDÍ SIMULAČNÍHO SOFTWARE WITNESS

Při spuštění simulačního softwaru Witness z roku 2008 se zobrazí pracovní okno, které lze vidět na Obrázku č. 10. V horní části okna nalezneme základní funkce umožňující například oddálení a přiblížení pracovní plochy, uzamknutí prvků, ikony pro grafické úpravy, uložení modelu nebo také tisk. Pod horní částí nalezneme samotnou pracovní plochu, ve které tvoříme fiktivní simulační model. Nalevo od pracovní plochy se nachází okno „*Element selector*“ se záložkou „*Model*“, kde se objevují všechny použité prvky v modelu. Ve spodní části můžeme nalézt okno „*Designer Elements*“, ze kterého vybíráme základní prvky pro vytvoření daného simulačního modelu. Napravo se nacházejí hodiny, které nám symbolizují plynoucí čas simulace. Pod veškerými těmito okny se nachází lišta s ikonami ovládajícími časový průběh simulačního modelu.



Obrázek č. 10 – Pracovní plocha softwaru Witness [autor]

3.2 ZÁKLADNÍ PRVKY PRO TVORBU SIMULACE

V simulačním softwaru máme na výběr širokou škálu stavebních prvků. Zde je výčet těch nejdůležitějších:

- „Part“ – **Součást** je prvek, který se samostatně pohybuje modelem nebo je nějakým způsobem zpracováván. V modelu se může jednat například o letoun, automobil, kontejner nebo výrobky procházející linkou.
- „Buffers“ – **Zásobník** znázorňuje nějakou frontu, vyčkávací okruh nebo sklad.
- „Machine“ – **Stroj** zpracovává jednotlivé součásti, můžeme si jej představit jako vzletovou a přistávací dráhu, návěstidlo na světelné křižovatce nebo nějaký stroj výrobní linky.
- „Labor“ – **Pracovník** obsluhuje stroje. Pro představu se může jednat o dispečera železnice, řídícího letového provozu apod.
- „Shift“ – **Směna** nám definuje pracovní dobu (směnu) pracovníků, strojů nebo součástí.
- „Vinteger“ – **Celočíselná proměnná** nám zobrazuje jednotlivé proměnné z oboru celých čísel.
- „Vreal“ – **Reálná proměnná** nám zobrazuje proměnné z oboru reálných čísel jako desetinná čísla.
- „Pie“ – **Koláčový graf** slouží jako výstup simulace, lze ho použít pro propojení výsledků jednotlivých experimentů s programem Microsoft Excel.

Všechny výše uvedené prvky je nutno nastavit, dále je možné definovat vstupní a výstupní pravidla těchto prvků. Každý prvek musí mít svůj specifický název, který bude zapsán bez diakritiky a bez mezer, aby nedocházelo k případným chybám v činnosti softwaru.

3.3 NASTAVENÍ PRVKŮ SIMULAČNÍHO MODELU

Nastavení součásti:

Na Obrázku č. 11 vidíme okno nastavení součásti vložené do simulačního modelu.

Jak již bylo zmíněno, každý prvek musí nést svůj specifický název, který bude zapsán bez mezer a bez diakritiky, zapíšeme jej do okna „NAME“. V následujícím okně „TYPE“ se zvolí o jaký typ součásti se jedná. Máme na výběr ze tří možností: Pasivní, Aktivní a Aktivní s profilem. Pokud se jedná o součást pasivní, znamená to, že tato součást do modelu nevstupuje sama, nýbrž musí být vtažena do modelu jiným prvkem, například strojem. Aktivní součást se sama pohybuje modelem, sama do něj vstupuje podle nastavených mezer mezi příchody. Aktivní součást s profilem rovněž vstupuje do modelu sama, ale je nutno k tomu definovat tzv. vstupní profil, ve kterém se nastavuje čas přicházejících součástí. V okně „ACTIONS ON CREATE“ a „ACTIONS ON LEAVE“ můžeme nastavit akce, které software provede při vytvoření součásti, nebo jejího výstupu ze simulačního modelu. Tímto jsme schopni provést jednotlivé výpočty nebo vytvořit potřebné grafy. Toto nastavení by bylo dostačující pro součást pasivní, aktivní součást toho umožňuje nastavit více.

V okně „MAXIMUM ARRIVAL“ se nastavuje maximální počet daných součástí, které do modelu vstupují během jedné simulace. Dále je možno nastavit čas vstupu první součásti do modelu v okně „FIRST ARRIVAL AT“. V případě, že bude potřebovat v našem simulačním modelu použít funkci směny, je možno ji definovat v okénku „SHIFT“. U aktivní součásti se dále definuje mezery mezi příchody součástí v okně „INTER ARRIVAL TIME“. Poslední okno, které se musí u součásti definovat je „TO“, což představuje, kterým směrem se bude daný prvek v simulačním modelu pohybovat.

Obr. 11 – Nastavení součásti [autor]

Nastavení zásobníku:

Stejně jako se u součásti nastaví název „NAME“. Dále se musí definovat maximální počet součástí v zásobníku – okno „CAPACITY“. Místa vstupu a výstupu do zásobníku se nastavují v okně „INPUT“ a „OUTPUT“. Software automaticky přednastaví řazení součástí na konec fronty a opuštění zásobníků z první pozice. V případě, že je potřeba, aby se součást zdržela v zásobníku, využijeme „DELAYS“. Definování akcí pro potřebné výpočty nebo pro tvorbu se provádí v oknech „ACTIONS ON INPUT“ nebo „ACTIONS ON OUTPUT“ totožně jako u součásti.

Obr. 12 – Nastavení zásobníku [autor]

Nastavení stroje:

Totožně jako u dvou předešlých prvků se musí nastavit jeho název „NAME“, dále se definuje priorita jednotlivých strojů „PRIORITY“, nebo-li kterému stroji má dát pracovník přednost. Nejnížší hodnotou je 0 (případně „LOWEST“) a 1 symbolizuje nejvyšší prioritu stroje. V okně „TYPE“ vybíráme typ stroje:

- „SINGLE“ - jednoduchý stroj
- „BATCH“ – dávkový stroj
- „ASSEMBLY“ – montážní stroj
- „PRODUCTION“ – produkční stroj
- „GENERAL“ – obecný stroj

Jednoduchý stroj zpracovává pouze 1 součást, do stroje vstupuje jedna součást a ta z něj i vystupuje. Do dávkového stroje vstupuje a také z něj vystupuje n součástí, rozdíl od jednoduchého stroje je v tom, že součásti zpracovává po částech, u dávkového stroje se definuje velikost dávky nebo-li počet součástí ve stroji. Montážní stroj má na vstupu několik součástí, které kompletuje dohromady do jedné součásti, která je na výstupu stroje. Opakem montážního stroje je stroj produkční, který z jedné součásti na vstupu vytvoří několik na výstupu. Posledním typem stroje je stroj obecný, do kterého vstupuje n součástí a vystupuje z něj m součástí.

U stroje je nezbytné nastavit jeho operační čas „CYCLE TIME“, což je doba zpracování součásti. Může se jednat o náhodnou proměnnou definovanou příslušným pravděpodobnostním rozdělením (např. NEGEXP(EX), POISSON(EX)) nebo se může jednat o konstantu. Průchod součásti strojem definujeme v oknech „FROM“ a „TO“, kde zapíšeme odkud z modelu součást do stroje vstupuje a kam bude putovat dál. V dalších oknech definujeme akce softwaru, ať už se jedná o potřebné výpočty nebo o grafy. Akce definované v oknech „ACTIONS ON INPUT“ a „ACTIONS ON OUTPUT“ se realizují po vstupu součásti do stroje nebo výstupu součásti ze stroje. Akce v okně „ACTIONS ON START“ se provádí při zpracování součásti ve stroji. Při ukončení zpracování součásti se provádí akce obsažené v okně „ACTIONS ON FINISH“.

Na Obrázku č.13 vidíme okno nastavení stroje vloženého do simulačního modelu.



Obrázek č. 13 – Nastavení stroje [autor]

3.4 VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ PRAVIDLA V SOFTWARE WITNESS

Pro správnou funkčnost simulačního softwaru je potřeba, abychom u každého prvku modelu definovali pomocí určitých pravidel a funkcí jeho průchod samotným simulačním modelem. Tyto pravidla a funkce mohou být u jednotlivých prvků zapsány na vstupu nebo výstupu.

3.4.1 ZÁKLADNÍ PRAVIDLA

- **WAIT** – Jedná se o základní vstupní i výstupní pravidlo, které zajišťuje pasivní čekání prvku. Toto pravidlo je softwarem přednastaveno u všech prvků simulačního modelu.
- **BUFFER** – Obdobou pravidla WAIT je pravidlo BUFFER, které taktéž nechává prvek pasivně čekat, ale vytváří přitom fiktivní zásobník s určitou kapacitou, kterou zapisujeme do závorky za toto pravidlo (např. BUFFER (20)).
- **PUSH** – Pravidlo patří do skupiny výstupních pravidel, které definují, do kterého prvku (např. stroje) bude daná součást modelu směřovat.
- **PULL** – Je analogií pravidla PUSH, rozdíl je v tom, že se jedná o vstupní pravidlo. Používá se v případě, že má nějaký prvek odebrat danou součást z jiného prvku (např. stroj odebírá součást ze zásobníku).
- **PERCENT** – Pokud potřebujeme procentuálně rozdělit součásti na vstupu nebo výstupu, použijeme toto pravidlo, které nám tok součástí rozdělí v přesném poměru,

který požadujeme (např. pravidlo „PERCENT letouny_cekajici_na_vzlet 15.00, letouny_cekajici_na_pristani 85.00“ způsobí, že 15 % všech součástí bude směřovat do zásobníku letouny_cekajici_na_vzlet a 85 % všech součástí bude směřovat do zásobníku s názvem letouny_cekajici_na_pristani).

- **LEAST FREE** – Toto vstupní pravidlo se využívá při odebrání dané součásti ze zásobníků. Nejprve se odebírá součást ze zásobníku, u kterého je jeho kapacita zaplněna více, poté se odebírá prvek s méně vytiženou kapacitou. V případě použití tohoto pravidla nevzniká tak velká fronta a součásti jsou rozptýleny mezi zásobníky rovnoměrněji, než je tomu u pravidla PULL.

3.4.2 ZÁKLADNÍ FUNKCE

- **NPARTS** – Funkce NPARTS určuje počet součástí, které se v určitém okamžiku nacházejí v daném prvku. Má pouze jeden parametr, kterým je název součástí. V některých případech může být tato funkce nedostačující z důvodu stanovení počtu součástí pouze jednoho jména, pokud bychom chtěli monitorovat více součástí stejného jména využijeme následující funkci NPARTS2.
- **NPARTS2** – Tato funkce umožňuje sledovat počet vícero součástí stejného jména v daném prvku. Funkce má 3 parametry, prvním parametrem je název sledovaného prvku, druhým parametrem je název součástí, jejíž počet chceme zjistit ve sledovaném prvku, třetí parametr nabývá následujících hodnot: 0,1,2 a 3. (0) znamená, že se bude jednat o stroj se zásobníky, (1) stroj bez zásobníků, (2) je vstupní zásobník stroje a (3) symbolizuje výstupní zásobník stroje.
- **APARTS** – Funkce APARTS určuje průměrný počet součástí v daném prvku (např. průměrný počet letounů čekajících na vzlet). Má pouze jeden parametr, kterým je název sledovaného prvku.
- **ATIME** – Určuje průměrný strávený čas součástí v daném prvku. Funkce má opět jenom jeden parametr, kterým je název prvku.
- **NCREATE** – Stanovuje počet vytvořených součástí daného jména během jednoho simulačního běhu.
- **NSHIP** – Stanovuje počet odeslaných součástí daného jména ze simulačního modelu.
- **NREJECT** – Stanovuje počet odmítnutých součástí daného jména na vstupu do simulačního modelu.

4 TVORBA SIMULAČNÍHO MODELU

Tato kapitola byla zpracována pomocí zdroje [12] [1].

Při tvorbě modelu vzletu a přistání bylo vycházeno ze základní myšlenky, kdy bylo určeno, jaké prvky budou obsaženy v modelu a zároveň bylo rozhodnuto, o jaký typ prvků se bude jednat. Pro přehlednost jsou tyto základní informace o prvcích shrnuty do následující Tabulky č.2:

Tabulka 2 – Základní prvky modelu [autor]

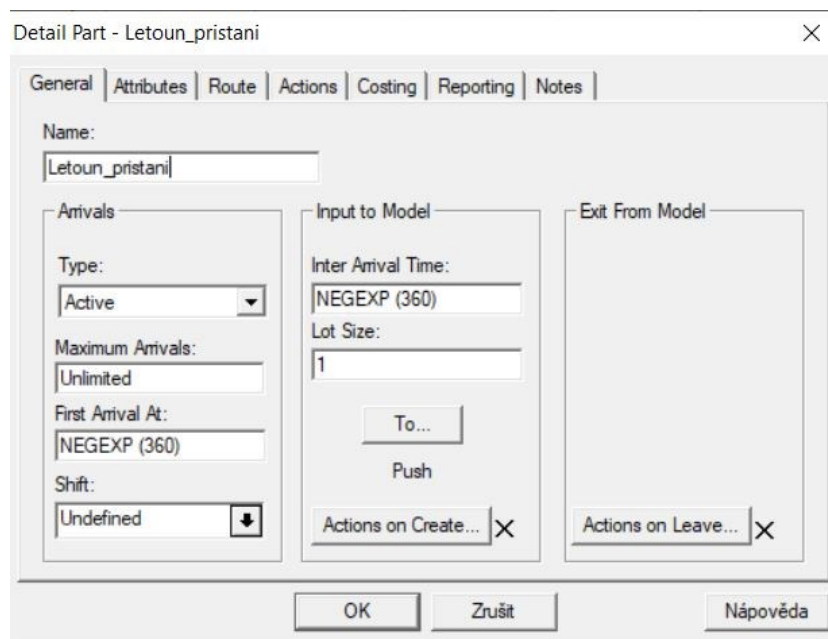
název	typ prvku
letoun vzlétající	aktivní součást
letoun přistávající	
letouny, které čekají na vzlet	zásobník
letouny, které čekají na přistání	
vzletová a přistávací dráha	jednoduchý stroj

V modelu vzletu a přistání bylo potřeba zahrnout letoun, který z letiště odlétá, a letoun, který se k letišti přibližuje a následně na něj přistává. V modelu jsou tyto letouny modelovány *aktivní součástí*, jelikož se jedná o součást samovolně se pohybující modelem. Dále bylo třeba zajistit nějakými prvky místa, kde letouny vyčkávají na již zmiňovaný vzlet nebo přistání. Nejvhodnějším prvkem pro zajištění tohoto jevu je v simulačním softwaru *zásobník*. V neposlední řadě bylo nutné nějakým prvkem znázornit vzletovou a přistávací dráhu, což je prvek, který zpracovává *součásti* – letouny – a tímto prvkem je *jednoduchý stroj*. Byl zvolen *jednoduchý stroj*, jelikož do něj na vstupu vchází pouze jedna *součást* a na výstupu z něj také jedna *součást* vystupuje. Na Obrázku č. 14 můžeme vidět převedení výše popsané myšlenky do simulačního softwaru.



Obrázek č. 14 – Rozvržení prvků [autor]

V této fázi tvorby simulačního modelu byly rozvrženy prvky na pracovní ploše simulačního softwaru Witness, jako další krok se pomocí funkcí a pravidel definoval tok součástí modelem. Nejprve byly nastaveny vstupní hodnoty u *součásti* Letoun_pristani, v okně „TYPE“ bylo nastaveno Active – aktivní typ součásti (viz Obrázek č. 15), což umožnilo nastavit čas prvního příletu „FIRST ARRIVAL AT“ a střední délku mezery mezi přílety „INTER ARRIVAL TIME“. Mezery mezi přílety letounů se řídí exponenciálním rozdělením se střední hodnotou 360 sekund, ve Witnessu zapsáno funkcí **NEGEXP(360)**. Toto zajišťuje tok v průměru 10 letounů za hodinu. Po nastavení časových intervalů bylo potřeba definovat, kam se má letoun dále v modelu pohybovat, to bylo provedeno v okně „TO“ následujícím zápisem: **PUSH to cekajici_na_pristani**. V simulačním softwaru to způsobí, že se prvek Letoun_pristani bude pohybovat do zásobníku cekajici_na_pristani. Analogicky byly tyto hodnoty nastaveny i u druhé součásti – Letoun_vzlet, mezery mezi odlety se opět řídí exponenciálním rozdělením se střední hodnotou 360 sekund, což dohromady s přistávajícími letouny zajišťuje průměrný počet 20 letounů za hodinu. Mezera mezi přílety nebo odlety odpovídá hodnotě 180 sekund, při této hodnotě je brán v úvahu případný rozstup letounů při turbulenci v úplavu. Jediná odlišnost v nastavení součásti oproti té předchozí přichází v případě výstupního pravidla **PUSH to cekajici_na_vzlet**, aby byl zajištěn tok vzlétajících letounů do správného zásobníku.



Obrázek č. 15 – Nastavení prvku Letoun_pristani [autor]

Nyní byly nastaveny vstupní a výstupní hodnoty u obou součástí, a proto bylo možné pokračovat s definováním zásobníků. V okně „CAPACITY“ byla zvolena kapacita 1000 letounů, aby nedocházelo k případnému odmítnutí součásti na vstupu do modelu, letouny se řadí za sebe do fronty, což je zapsáno v okně „INPUT – OPTION: Rear“, z řady bude letoun vystupovat z prvního místa fronty „OUTPUT – OPTION: Front“ (viz Obrázek č. 16). Pro výpočet průměrného počtu letounů čekajících ve frontě na přistání a pro výpočet průměrné doby čekání ve frontě na přistání byly vytvořeny dvě pomocné reálné *proměnné*:

- **Prum_fronta_pristani** = APARTS (cekajici_na_pristani)
- **Doba_pristani** = ATIME (cekajici_na_pristani)

Pro výpočet průměrného počtu letounů čekajících ve frontě na vzlet a pro výpočet průměrné doby čekání ve frontě na vzlet byly vytvořeny další dvě reálné *proměnné*:

- **Prum_fronta_vzlet** = APARTS (cekajici_na_vzlet)
- **Doba_vzlet** = ATIME (cekajici_na_vzlet)

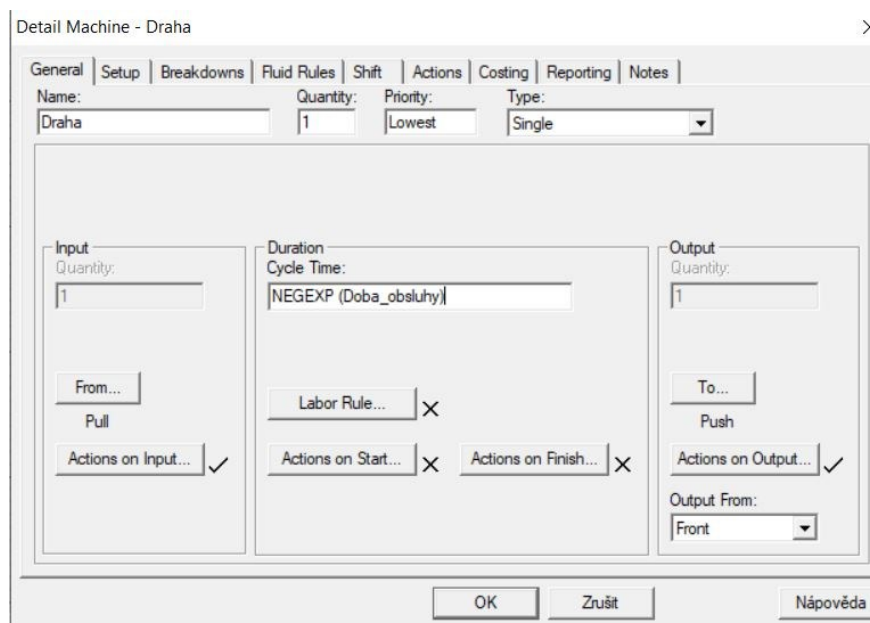
Výše zmíněné proměnné byly nadefinovány do koláčového grafu, který současně zajistí zápis těchto proměnných do MS Excel.

Obrázek č. 16 – Nastavení prvku *cekajici_na_pristani* [autor]

Dále bylo potřeba vypočítat počet přistávajících a vzlétajících letounů. Tento výpočet bude následně použit např. při výpočtu průměrného zdržení všech letounů. Ve Witnessu byly pro tento účel vytvořeny dvě reálné proměnné:

- **Pocet_pristani** = NSHIP (Letoun_pristani)
- **Pocet_vzletu** = NSHIP (Letoun_vzlet)

Po nastavení *součástí* a *zásobníků* přichází na řadu nastavení *stroje*. Před definováním vstupů a výstupů *stroje* bylo potřeba zavést pomocnou proměnnou pro střední dobu obsluhy (*Doba_obsluhy*), jejíž výpočet bude popsán v následující kapitole. Na Obrázku č.17 můžeme vidět, že v okně „TYPE“ byl zvolen typ jednoduchého stroje. Dále byla definována doba obsluhy, která se řídí exponenciálním rozdělením s parametrem *Doba_obsluhy*.



Obrázek č.17 – Nastavení prvku *Draha* [autor]

Do akcí na vstupu *stroje* bylo nadefinováno následující:

IF NPARTS2 (Draha, Letoun_pristani, 0) = 1

Doba_obsluhy = 166.667

ELSE

Doba_obsluhy = 170.889

ENDIF

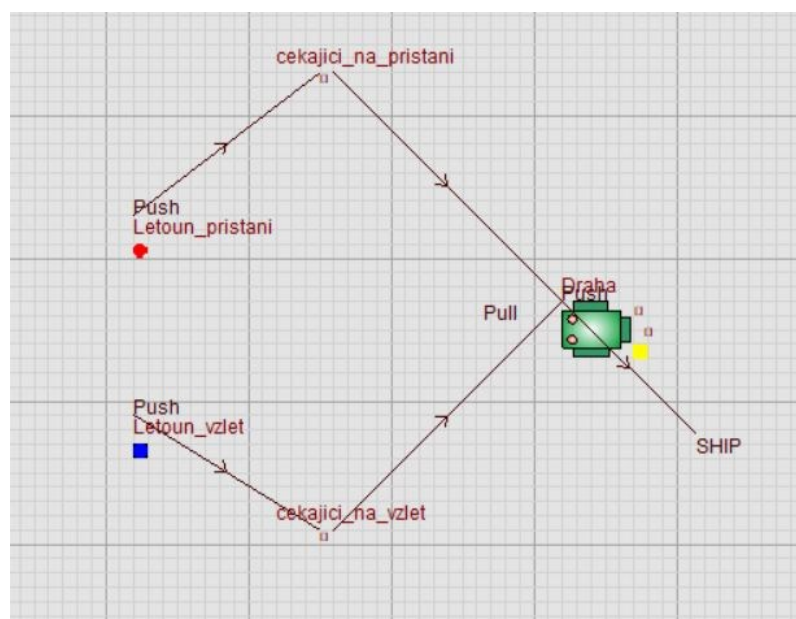
Tento zápis znázorňuje, že pokud do *stroje* Draha vstoupí součást Letoun_pristani, průměrná doba obsluhy této *součásti* bude trvat 166,667 sekund. V opačném případě vstoupí do *stroje* Draha Letoun_vzlet a průměrná doba obsluhy této *součásti* bude odpovídat průměrné době 170,889 sekund. Hodnoty byly vypočítány pomocí analýzy statistických dat naměřených Ing. Matouškem v akademickém roce 2016/2017 v kapitole číslo 4.2 [1].

V neposlední řadě bylo u tohoto stroje nadefinováno vstupní pravidlo v okně „FROM“ **PULL from cekajici_na_pristani,cekajici_na_vzlet**, což zapříčiňuje výběr součástí do stroje z příslušného zásobníku a také bylo definováno výstupní pravidlo v okně „TO“ **PUSH to SHIP**, což způsobuje, že součást po průchodu strojem odchází z modelu pryč.

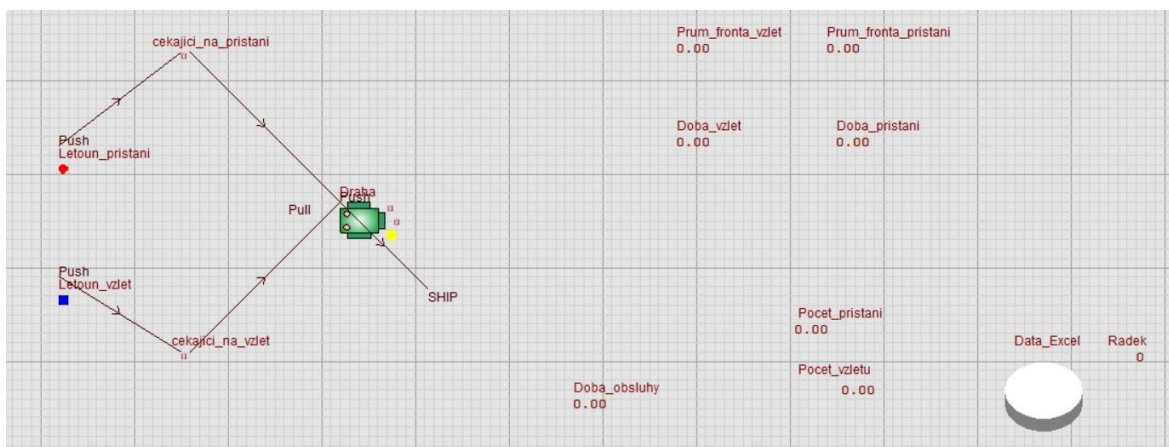
V následující Tabulce č. 3 lze vidět shrnutí použitých prvků v mém simulačním modelu:

Tabulka 3 – Prvky simulačního modelu [autor]

Název prvku v simulačním softwaru	Typ prvku	Co prvek představuje
Letoun_pristani	součást	přistávající letoun
Letoun_vzlet	součást	vzlétající letoun
cekajici_na_pristani1	zásobník	letouny, které čekají na přistání
cekajici_na_vzlet1	zásobník	letouny, které čekají na vzlet
Draha1	stroj	vzletová a přistávací dráha
Doba_obsluhy1	reálná proměnná	pomocná proměnná pro stroj
Doba_pristani1	reálná proměnná	průměrná doby čekání na přistání
Doba_vzlet1	reálná proměnná	průměrná doby čekání na vzlet
Prum_fronta_pristani	reálná proměnná	průměrný počet letounů čekajících na přistání
Prum_fronta_vzlet	reálná proměnná	průměrný počet letounů čekajících na vzlet
Radek1	celočíslná proměnná	pomocná proměnná pro zápis do MS Excel
Data_Excel1	koláčový graf	pomocný graf pro zápis hodnot do MS Excel
Pocet_pristani1	reálná proměnná	počet letounů, které přistály
Pocet_vzletu1	reálná proměnná	počet letounů, které vzlétly



Obrázek č. 18 – Simulační model [autor]



Obrázek č. 19 – Simulační model s pomocnými proměnnými [autor]

4.1 ZÁPIS HODNOT DO MICROSOFT EXCEL

Simulační software Witness je schopen spolupracovat s programem Microsoft Excel (dále MS Excel). Software Witness umí ze souboru MS Excel načítat hodnoty proměnných a také zde umí hodnoty zapisovat. Pro zápis hodnot je možno použít koláčový graf, do kterého zapišeme danou funkci nebo definici jednotlivých proměnných. Při spuštění simulačního experimentu se hodnoty námi vybraných proměnných automaticky zapisují do jednotlivých buněk v MS Excel. Pro načtení a zápis dat používáme ve Witnessu funkci *XLReadArray* pro čtení a *XLWriteArray* pro zápis v následujícím tvaru: ***XLReadArray* (název souboru, název listu, buňka, sledovaná proměnná, způsob zápisu)**

- Název souboru – zapisujeme do uvozovek celý název souboru včetně přípony souboru.
- Název listu – opět zapisujeme do uvozovek, jedná se o název listu, ze kterého software Witness načte hodnotu proměnné.
- Buňka – odkazuje na buňku, ze které bude hodnota proměnné do Witnessu načtena.
- Sledovaná proměnná – proměnná, do které se mají hodnoty zapisovat, název musí být shodný s názvem ve Witnessu, zapisujeme již bez uvozovek.
- Způsob zápisu – volíme buď to 1 nebo 0. Ve většině případů se používá 1, jelikož se jedná o zápis hodnot do řádků, přičemž jsou v jednotlivých sloupcích rozdílné proměnné. V případě zvolení 0 bude Witness hodnoty zapisovat (číst) opačně.

V Tabulce č.4 můžeme vidět příklad plovoucího zápisu. Nejprve software Witness načte hodnotu pomocné proměnné „*Radek*“, aby určil, do kterého řádku má hodnoty zapsat a dále již bude hodnoty jen zapisovat. Do sloupce „*A*“ zapiše vypočtenou hodnotu proměnné

„Prum_fronta_vzlet“. Dále bude pokračovat zápisem hodnot proměnné „Prum_fronta_pristani“ do sloupce „B“. Do sloupců „C“ a „D“ se zapíšou vypočtené hodnoty proměnných „Doba_vzlet“ a „Doba_pristani“. Posledními vypočtenými proměnnými jsou „Počet_vzletu“ a „Počet_pristani“, které Witness zapíše do sloupců „E“ a „F“. Po těchto výpočtech bude následovat připočtení jedničky k původní proměnné „Radek“, tato hodnota přepíše původní hodnotu proměnné v buňce „H2“ a při dokončení dalšího simulačního běhu zapíše vypočtené hodnoty proměnných dané replikace do následujícího řádku [12].

Tabulka 4 – Plovoucí zápis do MS Excel [autor]

XLReadArray ("Data_model.xlsx","List1","H2",Radek,1)
XLWriteArray ("Data_model.xlsx","List1","A" + Radek,Prum_fronta_vzlet,1)
XLWriteArray ("Data_model.xlsx","List1","B" + Radek,Prum_fronta_pristani,1)
XLWriteArray ("Data_model.xlsx","List1","C" + Radek,Doba_vzlet,1)
XLWriteArray ("Data_model.xlsx","List1","D" + Radek,Doba_pristani,1)
XLWriteArray ("Data_model.xlsx","List1","E" + Radek,Pocet_vzletu,1)
XLWriteArray ("Data_model.xlsx","List1","F" + Radek,Pocet_pristani,1)
Radek = Radek + 1
XLWriteArray ("Data_model.xlsx","List1","H2",Radek,1)

4.2 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VSTUPNÍCH DAT

Tato kapitola je věnována statistickému zpracování naměřených dat Ing. Matouška v akademickém roce 2016/2017 [1]. Tyto naměřené hodnoty z letiště Leoše Janáčka v Ostravě jsou použity jako vstupní data statistické analýzy. Dále budou použity ke srovnání s daty, které vypočítá simulační software Witness.

Nejprve jsou zpracována data pro vzlet, poté pro přistání. V Tabulce č.5 můžeme vidět statistický soubor s daty o každém vzletu, v jednotlivých časech vzletů jsou již započítány bezpečnostní rozstupy [1] [12] [14] [15].

Tabulka 5 – Časy vzletu [1, úprava autor]

VZLET	TYP LETOUNU	ČAS S ROZESTUPEM [s]
1	ATR72	107
2	A320	183
3	ATR72	79
4	SF34	118
5	ATR45	211
6	C680	85
7	SR22	395
8	C25A	180
9	B737	67
10	C25A	244
11	ATR72	105
12	BE9L	260
13	C56X	169
14	ATR72	173
15	SR22T	330
16	ATR72	108
17	AN26	168
18	B737	94

Doba vzletu se zde pohybuje od 67 sekund do 6,5 minut, což je poměrně široká škála, ale například z hlediska rozdílného výkonu různých typů letounů to je pochopitelné. S velkou pravděpodobností vzlétne rychleji dvoumotorový proudový letoun Boeing – B737 než jednomotorový turbopropový letoun Cirrus – SR22. Samozřejmě dobu vzletu i přistání ovlivňuje mnoho dalších faktorů, jako jsou rozestupy mezi letouny, povrch vzletové a přistávací dráhy, zkušenosti pilota, meteorologické podmínky a mnoho dalších. Proto již dále nebude bráno v potaz, o jaký typ letounu se jedná, pro další výpočty budou použity pouze jednotlivé časy vzletu a přistání.

Pro výpočet číselných charakteristik byla použita *Analýza dat* v programu MS Excel. V následující Tabulce č. 6 lze vidět výsledky této analýzy.

Tabulka 6 – Analýza dat vzletu [autor]

Vzlet	
Stř. hodnota [s]	170,89
Chyba stř. hodnoty [s]	21,27
Medián [s]	168,5
Směr. odchylka [s]	90,22
Rozptyl výběru [s ²]	8140,22
Variační rozpětí [s]	328
Minimum [s]	67
Maximum [s]	395
Součet [s]	3076
Počet	18

- **Střední hodnota** nám sděluje odhad střední doby vzletu, což je 170,89 sekund. V Excelu ji lze vypočítat funkcí *PRŮMĚR*.
- Tato střední hodnota kolísá o hodnotu **chyby střední hodnoty (SEM – Standard error of the mean)**, nebo-li odchylku průměru 21,27 sekund. Chybu střední hodnoty vypočteme dle vzorce:

$$SEM = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

kde σ je směrodatná odchylka a n počet sledovaných prvků.

- **Medián** 168,5 s určuje prvek, ve kterém se statistický soubor rozděluje na dvě poloviny se stejným počtem prvků.
- Hodnota **směrodatné odchylky** je 90,22 s. Poukazuje na velkou odlišnost zpracovávaného statistického souboru. V Excelu se vypočítá pomocí funkce *SMODCH.VÝBĚR*.
- **Rozptyl výběru** je 8140,22 s². Jedná se o druhou mocninu směrodatné odchylky, v excelu můžeme vypočítat s pomocí funkce *VAR.VÝBĚR*.
- **Variační rozpětí** se vypočítá odečtením minimální hodnoty od té maximální, v našem případě to bude 328 s.
- **Minimální doba** vzletu je 67 s a **maximální doba** vzletu činila 395 s.
- **Součet** všech hodnot doby vzletu je 3076 s. Celkový **počet** naměřených vzletů byl 18.

Po výpočtu výše zmíněných charakteristik byla statistická data rozdělena do jednotlivých tříd. Pro rozdělení souboru do tříd je nutné vypočítat šířku třídy a počet tříd. Počet tříd vypočítáme pomocí vzorce Sturgesova pravidla:

$$k \doteq 1 + 3,3 * \log n$$

kde n je rozsah sledovaného souboru. Po dosazení do vzorce vypočteme hodnotu $k = 5,14$, kterou následně zaokrouhlíme na 6. Počet tříd byl zvolen 6 z toho důvodu, že kdyby se k zaokrouhlilo směrem dolů na 5, vznikly by dvě třídy s nulovou četností, což je nežádoucí.

$$k = 1 + 3,3 * \log 18 = 5,142399 \doteq 6$$

Pro zjištění šířky třídy postupujeme dle vzorce:

$$h = \frac{v_{max} - v_{min}}{k}$$

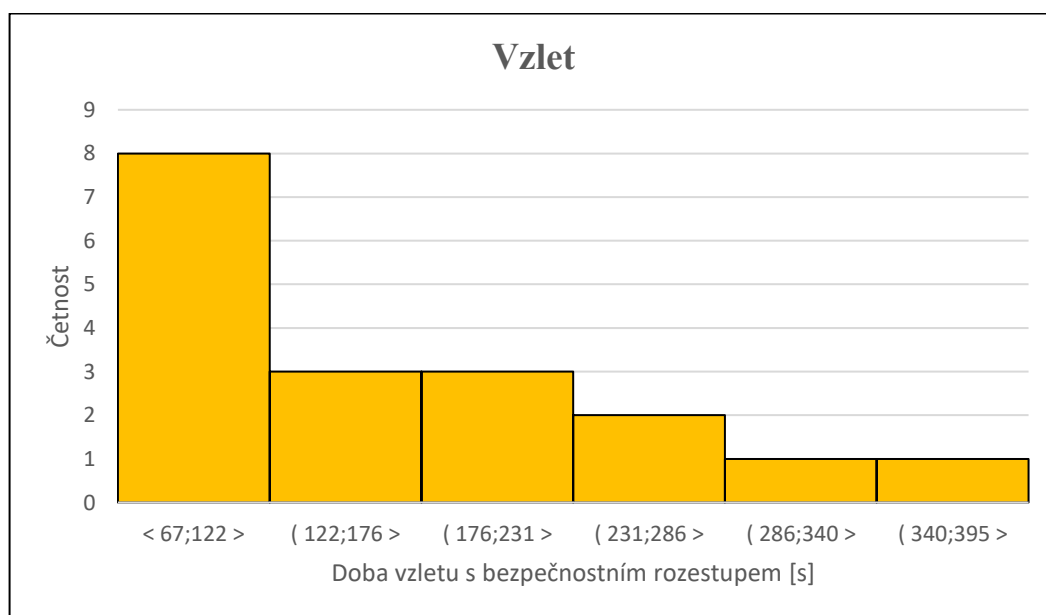
kde v_{max} je maximální čas vzletu a v_{min} je minimální čas vzletu. Po dosazení získáváme:

$$h = \frac{395 - 67}{6} \doteq 55$$

V Tabulce č.7 můžeme vidět intervaly jednotlivých tříd a jejich četnosti:

Tabulka 7 – Rozdělení souboru do tříd pro vzlet [autor]

třída	interval třídy	třídní četnost
1	< 67;122 >	8
2	(122;176 >	3
3	(176;231 >	3
4	(231;286 >	2
5	(286;340 >	1
6	(340;395 >	1



Obrázek č. 20 - Graf rozdělení souboru do tříd pro vzlet [autor]

Na Obrázku č. 20 lze pozorovat vysokou četnost vzletů ve třídě od 67 do 122 sekund, poté četnost vzletů klesá s rostoucím časem vzletu. Z grafu je patrné, že 14 letounů vzlétne v rozmezí od 67 do 231 sekund a 4 letouny vzlétnou v rozmezí od 231 do 395 sekund. V rozmezí od 78 do 231 sekund vzlétne pouze 13 letounů (39,39 % všech naměřených letounů), rozmezí od 78 sekund bylo zvoleno z důvodu dalšího srovnání s daty přistání.

Stejným postupem pro zpracování dat pro vzlet bylo pokračováno i při zpracování dat pro přistání. V Tabulce č.8 můžeme vidět statistický soubor s daty o každém přistání, v jednotlivých časech přistání jsou již započítány bezpečnostní rozstupy.

Tabulka 8 – Časy přistání [1, úprava autor]

PŘISTÁNÍ	TYP LETOUNU	ČAS S ROZESTUPEM [s]
1	ATR72	95
2	SF34	116
3	ATR45	190
4	ATR72	121
5	B737	142
6	BE9L	115
7	ATR72	188
8	B737	200
9	SR22	302
10	SR22T	316
11	A319	223
12	AN26	85
13	B737	79
14	ATR72	78
15	SR22	250

Doba přistání se pohybuje od 78 sekund do 5,27 minut. Jak je již zmiňováno výše, čas přistání i vzletu může ovlivnit nespočet faktorů, ale i přes to je maximální hodnota doby přistání nižší, než je tomu u vzletu. Pokud srovnáme minimální hodnotu doby přistání, tak ta je vyšší, než tomu bylo u vzletu. Pro výpočet číselných charakteristik byla použita opět *Analýza dat* v programu MS Excel. V následující Tabulce č. 9 lze vidět výsledky této analýzy dat pro přistání.

Tabulka 9 – Analýza dat přistání [autor]

Přistání	
Stř. hodnota [s]	166,67
Chyba stř. hodnoty [s]	20,49
Medián [s]	142
Směr. odchylka [s]	79,34
Rozptyl výběru [s^2]	6294,81
Variační rozpětí [s]	238
Minimum [s]	78
Maximum [s]	316
Součet [s]	2500
Počet	15

- **Střední hodnota** nám sděluje odhad střední doby přistání, což je 166,67 sekund, což je méně než u vzletu.
- **Chyba střední hodnoty (SEM – Standard error of the mean)**, nebo-li odchylka průměru je 20,49 sekund.
- **Medián** 142 rozděluje statistický soubor na dvě poloviny se stejným počtem prvků. Modus pro tyto data neexistuje z důvodu nevyskytování se vícero stejných hodnot doby přistání.
- Hodnota **směrodatné odchylky** je 79,34 s. Tato hodnota je menší než u vzletu, což poukazuje na menší odlišnost dat pro přistání.
- **Rozptyl výběru** je 6294,81 s^2 . Jedná se o druhou mocninu směrodatné odchylky.
- **Variační rozpětí** se vypočítá odečtením minimální hodnoty od té maximální, výsledná hodnota je 238 s.
- **Minimální doba** přistání je 78, což je více než u vzletu a **maximální doba** přistání činí 316 s, což je méně než u vzletu.
- **Součet** všech hodnot doby vzletu je 2500 s. Celkový **počet** naměřených vzletů byl 15.

Po statistické analýze bylo provedeno rozdělení dat přistání do tříd, analogicky, jak je tomu i u statistických dat vzletu. Počet tříd vypočítáme pomocí vzorce Sturgesova pravidla:

$$k = 1 + 3,3 * \log 15 = 4,881101155 \doteq 5$$

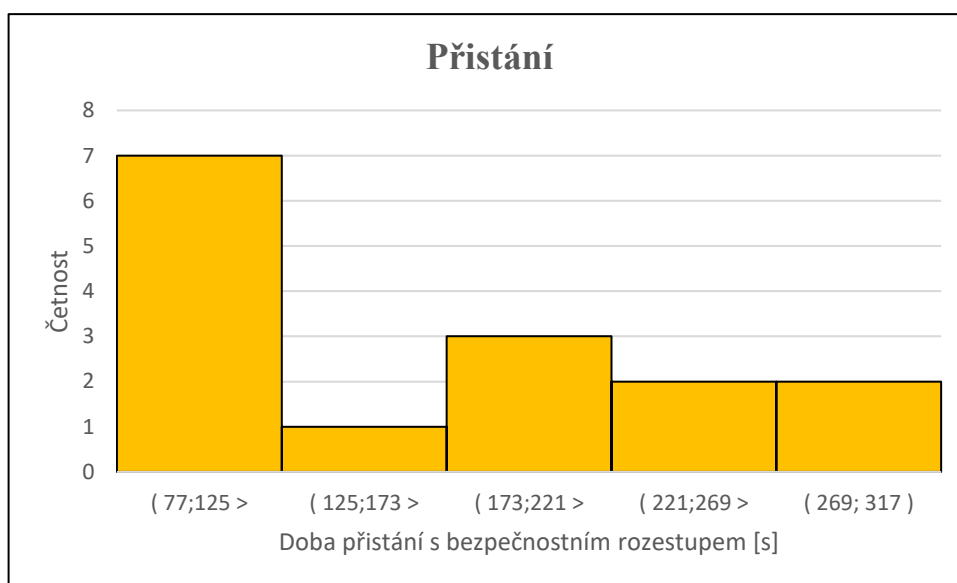
Bylo zvoleno 5 tříd, dále se vypočítá šířka třídy podle následujícího vzorce:

$$h = \frac{v_{max} - v_{min}}{k} = \frac{316 - 78}{5} \doteq 48$$

V Tabulce č.10 lze vidět samotné rozdělení dat přistání do tříd.

Tabulka 10 - Rozdělení souboru do tříd pro přistání [autor]

třída	interval třídy	třídní četnost
1	(77;125 >	7
2	(125;173 >	1
3	(173;221 >	3
4	(221;269 >	2
5	(269; 317)	2



Obrázek č. 21 - Graf rozdělení souboru do tříd pro přistání [autor]

Na Obrázku č. 21 vidíme rozdělení dat pro přistání do jednotlivých tříd. Nejvyšší četnosti je dosaženo v první třídě s časem přistání od 77 do 125 sekund. V rozmezí od 78 do 231 sekund přistane 12 letounů (36,36 % všech naměřených letounů), což je o jeden letoun méně než u vzletu. Z toho vyplývá, že do určitého časového rozmezí přistane o přibližně 3,03 % více letounů, než jich vzlétne.

4.3 TVORBA EXPERIMENTU

Vytvoření simulačního modelu se věnuje úvod kapitoly 4, tato kapitola se bude věnovat tvorbě simulačních experimentů. Bylo nutné navrhnout jednotlivé simulační experimenty, které se budou lišit v proudu pseudonáhodných čísel. V našem případě se hodnoty pseudonáhodných čísel budou řídit exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti s proměnlivou střední hodnotou, v excelu zapsáno pomocí funkce *NEGEXP (EX)* se střední hodnotou *EX*. Jelikož model obsahuje náhodné proměnné, jedná se o systém stochastický, tudíž výsledky experimentů budou náhodné i při stejných vstupních podmínkách.

Před tvorbou simulačního experimentu byly vypočteny střední hodnoty délek mezer mezi letouny, jak lze vidět na Tabulce č.11. Bylo zvoleno 11 experimentů s různou střední hodnotou exponenciálního rozdělení. Střední hodnota se vypočítala podle následujícího vzorce:

$$EX = \frac{1}{\lambda} [h]$$

kde je λ intenzita vstupního toku, v našem případě počet letounů. Pro příklad vypočtení středních hodnot byla zvolena intenzita vstupního toku 3 letouny za hodinu. Z důvodu toku dvou *součástí* (přistávající a vzlétající letoun) ze dvou *zásobníků* do jednoho *stroje* (vzletová a přistávací dráha) je hodnota *EX* vynásobena 2. Dále výsledek vynásobíme 60 z toho důvodu, abychom měli všechny hodnoty v simulačním modelu ve stejných jednotkách, tzn. v sekundách.

$$EX = \frac{60}{3} = 20 \text{ min}$$

$$EX = 20 * 2 = 40 * 60 = 2400 \text{ s}$$

Tabulka 11 – Střední hodnota *EX* [autor]

Průměrný počet letounů za hodinu	EX [min]	EX [s]
1	120	7200
2	60	3600
3	40	2400
4	30	1800
5	24	1440
6	20	1200
10	12	720
15	8	480
19	6,32	379
20	6	360
21	5,71	343

Dále bylo potřeba určit simulační čas 1 simulačního běhu, pro naše potřeby byla zvolena doba 30 dní, což v sekundách odpovídá číslu 2 592 000. Poté se musel zvolit počet replikací a s tím i tzv. *Stream Offset*, který zajistí při každé replikaci rozdílný proud pseudonáhodných čísel. Simulační běh každé replikace tedy trval 2 592 000 s, bylo určeno, že počet replikací takového simulačního běhu bude 10. Výjimka délky simulačního běhu nastává v případě intenzity vstupního toku 21 letounů za hodinu, kde se ukázalo, že simulační čas 30 dní je nedostačující. Byl vytvořen experiment s délkou simulačního času 50 let z důvodu zjištění vývoje hodnot sledovaných charakteristik v delším časovém období. Při tomto experimentu se ukázalo, že hodnoty sledovaných charakteristik se ustálí až po podstatně delším simulačním čase. Pro získání relevantních výsledků byl zvolen při intenzitě vstupního toku 21 letounů za hodinu simulační čas o délce 60 dní [12].

5 VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ

Jak je již zmíněno výše, bylo provedeno 11 simulačních experimentů. Výsledky z těchto simulačních experimentů budou srovnány s výsledky Ing. Matouška dosaženými v jeho bakalářské práci [1]. Výsledky jsou porovnávány v jednotlivých tabulkách pro každou číselnou charakteristiku. V experimentech byly sledovány dvě číselné charakteristiky:

- EW – průměrná doba čekajících letounů ve frontě na vzlet nebo přistání
- EL – průměrný počet letounů ve frontě na vzlet nebo přistání

Pro výpočet číselných charakteristik naměřených dat bylo potřeba nejprve vypočítat parametr μ exponenciální náhodné proměnné modelující dobu obsluhy a intenzitu provozu ρ dle následujících vzorců:

$$\mu = \frac{1}{\bar{x}} * 3600$$

$$\mu = \frac{3600}{168,97}$$

$$\mu = 21,31 \text{ letounů/h}$$

kde je \bar{x} střední hodnota všech naměřených vzletů a přistání, vynásobení 3600 je zde z důvodu převodu ze sekund na hodiny, aby byla zachována stejná jednotka. Pro vzorové příklady je použita intenzita vstupního toku 10 letounů za hodinu.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

$$\rho = \frac{10}{21,31} = 0,47$$

Průměrný počet letounů ve frontě EL vypočítáme dle vzorce:

$$EL = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

$$EL = \frac{0,47^2}{1 - 0,47} = 0,42$$

V následující Tabulce č. 12 můžeme vidět výsledky číselných charakteristik:

Tabulka 12 - Porovnání průměrného počtu čekajících letounů ve frontě [autor]

Skutečná intenzita vstupního toku [letoun/h]	Simulovaná intenzita vstupního toku [letoun/h]	Výpočty z naměřených dat		Výpočty z Witnessu		
		Intenzita provozu - ρ	EL [letoun]	EL [letoun]	Dolní mez [letoun]	Horní mez [letoun]
1	0,98	0,0469	0,0023	0,0021	0,0019	0,0023
2	1,98	0,0939	0,0097	0,0095	0,0090	0,0099
3	2,96	0,1408	0,0231	0,0224	0,0216	0,0231
4	3,97	0,1877	0,0434	0,0427	0,0411	0,0443
5	4,96	0,2347	0,0720	0,0710	0,0680	0,0740
6	5,94	0,2816	0,1104	0,1085	0,1031	0,1139
10	9,94	0,4694	0,4152	0,4065	0,3678	0,4453
15	14,96	0,7040	1,6748	1,6045	1,3377	1,8713
19	18,96	0,8918	7,3490	7,0008	5,2341	8,7676
20	19,95	0,9387	14,3800	13,3721	9,6135	17,1306
21	20,89	0,9857	67,7327	45,8309	30,9133	60,7486

Výpočty z naměřených dat Ing. Matouška [1] byly srovnány s mezemi 95 % intervalu spolehlivosti vypočtenými z dat simulačních experimentů ve Witnessu. Tyto meze byly vypočteny pomocí funkce *CONFIDENCE* v Excelu. K hodnotě číselné charakteristiky *EL* vypočtené z Witnessu byla hodnota funkce *CONFIDENCE* přičtena nebo od ní byla odečtena a tímto způsobem se získaly dolní a horní meze pro jednotlivé experimenty.

Dle červené a zelené barvy lze jednoduše určit, zda-li výpočty hodnot Ing. Matouška [1] spadají do uvedených mezí vypočtených z výstupních dat ze simulačního softwaru Witness. Při intenzitě vstupního toku 1 až 20 letounů za hodinu tyto hodnoty odpovídají vypočteným mezím, při intenzitě vstupního toku 21 letounů za hodinu *EL* dosahuje hodnoty 67,73 letounů ve frontě a vypočtená hodnota se nepohybuje v mezích určených ze simulačních experimentů. Tuto skutečnost můžeme zdůvodnit faktem, že v simulačním modelu nelze přesně simulovat intenzitu vstupního toku 21 letounů za hodinu a dále, že v mé bakalářské práci simulační model rozlišuje, zda-li se jedná o vzlet nebo přistání, zatímco v bakalářské práci Ing. Matouška [1] se pracuje s daty o vzletu a přistání dohromady. Rozdíl skutečné a simulované intenzity vstupního toku letounů můžeme vidět v tabulce. V případě intenzity 21 letounů za hodinu simulovaná hodnota intenzity vstupního toku nabývá hodnoty 20,89 letounů za hodinu.

Tabulka 13 – Vývoj *EL* v čase [autor]

Intenzita vstupního toku	21 letounů za hodinu			
Simulační čas	1 měsíc	2 měsíce	1 rok	10 let
EL	37,95	45,83	48,94	58,43

V Tabulce č. 13 vidíme vývoj počtu čekajících letounů *EL* během jednotlivých délek simulačních časů při intenzitě vstupního toku průměrně 21 letounů za hodinu jak již bylo zmiňováno v kapitole 4.3, experiment s délkou simulačního času 50 let ukázal, že se hodnoty

ustálí až po podstatně delším simulačním čase, což může být důvod, proč naměřené hodnoty u intenzity průměrně 21 letounů za hodinu nezapadají do vypočtených mezí Witnessu.

Pro výpočet průměrné doby čekajících letounů EW byly nejprve vypočteny hodnoty průměrného počtu čekajících letounů EL , jak můžeme vidět výše a dále byly dosazeny do vzorce:

$$EW = \frac{EL}{\lambda} = \frac{0,42}{10} = 0,04 * 3600 = 149,46 \text{ s}$$

V následující Tabulce č. 14 můžeme vidět výsledky číselných charakteristik:

Tabulka 14 – Porovnání průměrné doby čekání ve frontě [autor]

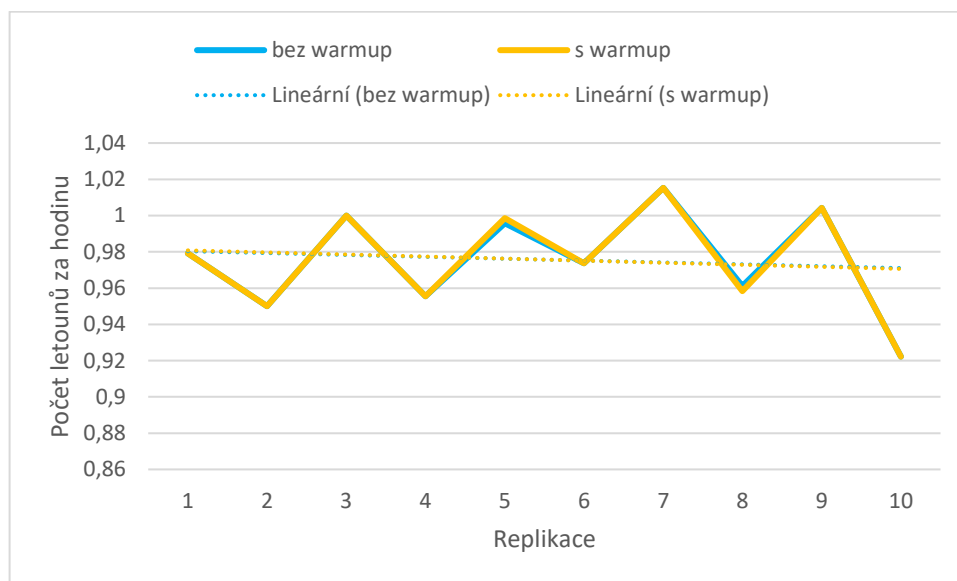
Výpočty z naměřených dat			Výpočty z Witnessu		
Intenzita vstupního toku [letoun/h]	Intenzita provozu - ρ	EW [s]	EW [s]	Dolní mez [s]	Horní mez [s]
1	0,047	8,321	7,730	6,074	9,386
2	0,094	17,505	17,226	15,734	18,719
3	0,141	27,691	27,239	25,321	29,157
4	0,188	39,056	38,723	35,883	41,563
5	0,235	51,813	51,541	47,203	55,879
6	0,282	66,238	65,713	59,404	72,023
10	0,469	149,457	147,179	119,146	175,213
15	0,704	401,952	385,997	257,833	514,162
19	0,892	1392,449	1327,953	657,534	1998,373
20	0,939	2588,393	2407,033	1054,489	3759,577
21	0,986	11611,312	7844,490	2729,482	12959,498

Výpočty z naměřených dat Ing. Matouška [1] byly opět srovnány s mezemi 95 % intervalu spolehlivosti vypočtenými z dat simulačních experimentů ve Witnessu. Tyto meze byly vypočteny pomocí funkce *CONFIDENCE* v Excelu.

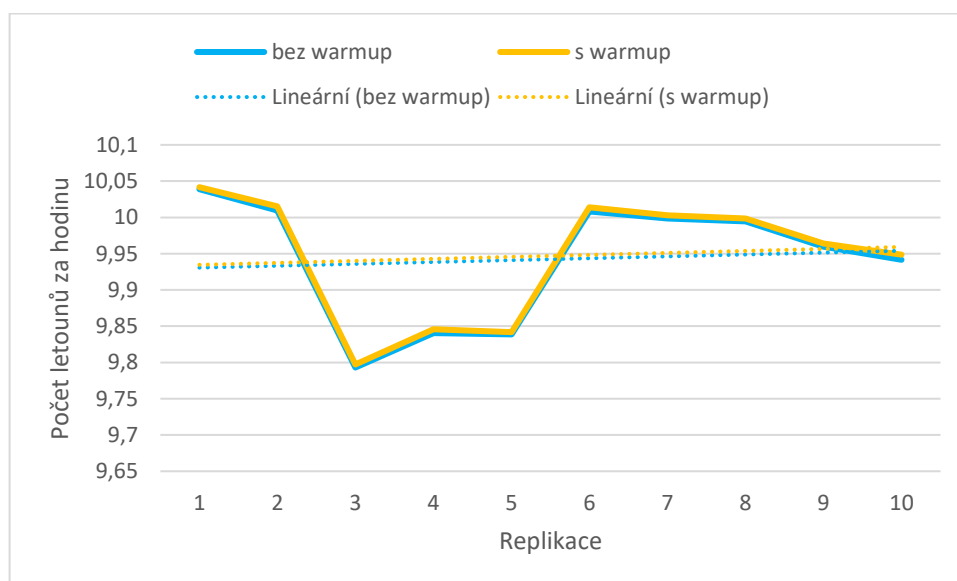
Zelená barva signalizuje, že výpočty hodnot Ing. Matouška [1] spadají do uvedených mezí vypočtených z výstupních dat ze simulačního softwaru Witness při všech intenzitách vstupního toku. Nicméně při intenzitě vstupního toku 21 letounů za hodinu dosahuje průměrná doba čekání letounů na vzlet nebo přistání hodnoty 193,52 minut. Tato hodnota je poněkud nerealná, dle předpisu L6 je předepsaná konečná zásoba paliva na 30 min letu podle pravidel IFR (Instrumental Flight Rules – pravidla pro let podle přístrojů) [16] [17].

5.1 POUŽITÍ WARMUP PERIODY

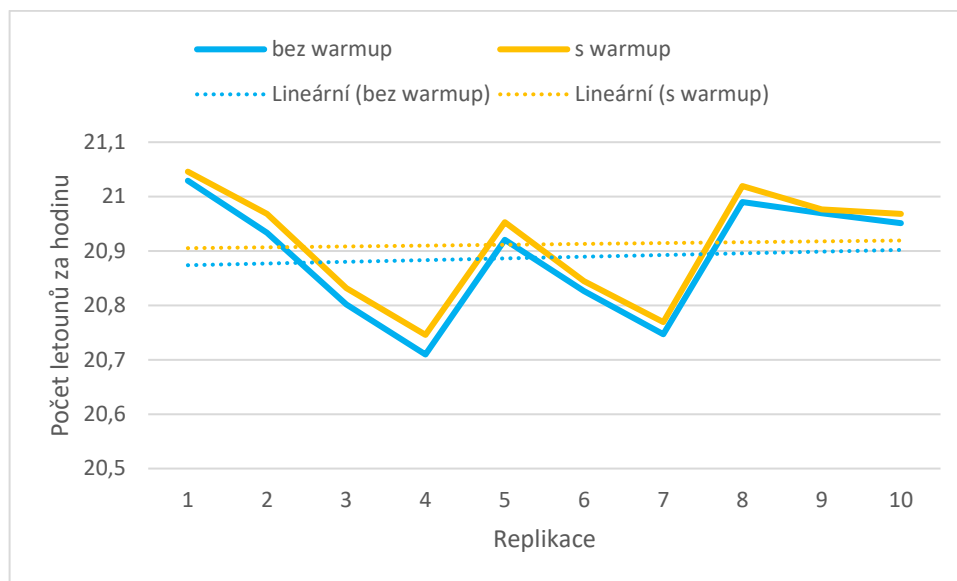
Při nastavení simulačního času experimentu se zde nabízí možnost tzv. *WARMUP* periody, což můžeme chápat jako nějakou zahřívací periodu, během které simulační model nevypočítává požadované číselné charakteristiky, ani nezapisuje výstupní data. Toto můžeme využít k ustálení hodnot vypočtených charakteristik. V tomto experimentu byla použita *WARMUP* perioda o délce 12 hodin (43 200 s) při intenzitě vstupního toku 1,10 a 21 letounů za hodinu.



Obrázek č. 22 - Graf použití *WARMUP* periody při intenzitě vstupního toku 1 letoun za hodinu [autor]



Obrázek č. 23 – Graf použití *WARMUP* periody při intenzitě vstupního toku 10 letounů za hodinu [autor]



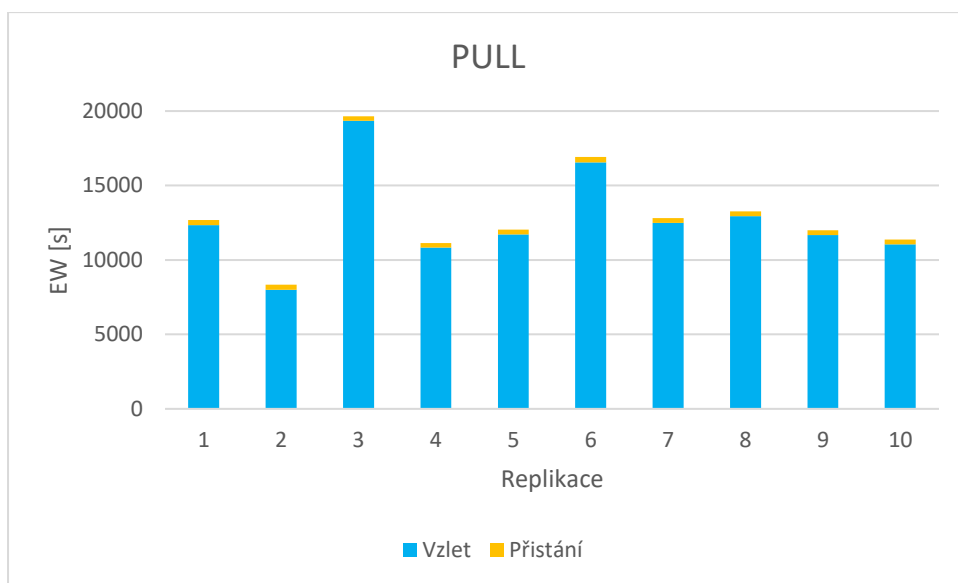
Obrázek č. 24 - Graf použití WARMUP periody při intenzitě vstupního toku 21 letounů za hodinu [autor]

Z Obrázků č. 22, 23 a 24 je zřejmé, že při nižší intenzitě vstupního toku letounů se hodnoty průměrného počtu letounů nijak zásadně neliší. V případě intenzity průměrně 1 letounu za hodinu se hodnoty s *WARMUP* a bez *WARMUP* liší pouze při páté a osmé replikaci z 10. Při intenzitě 10 a 21 letounů jsou hodnoty vychýleny o něco více. S rostoucí intenzitou vstupního toku průměrné hodnoty číselných charakteristik mírně stoupají, ale i tak jsou tyto rozdíly zanedbatelné. Z toho důvodu nebyla *WARMUP* perioda v simulačních experimentech dále použita.

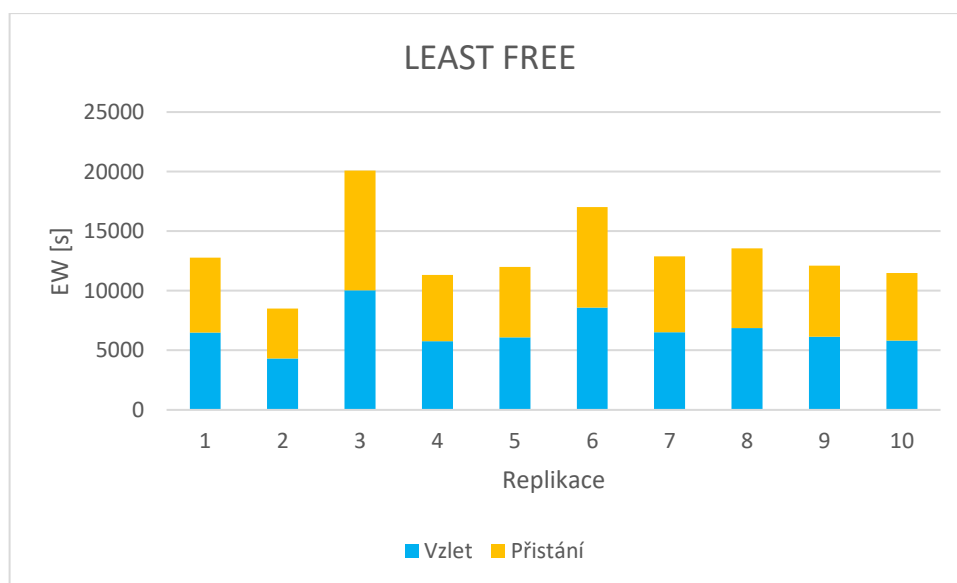
5.2 VSTUPNÍ PRAVIDLO LEAST FREE

Při dalším experimentu byl zkoumáný vliv vstupního pravidla *stroje* vzletové a přistávací dráhy. V původním experimentu bylo použito vstupní pravidlo PULL, díky kterému *stroj* vybíral nejprve ze *zásobníku čekající_na_pristani* a poté ze *zásobníku čekající_na_vzlet*, aby výběr nebyl v rozporu s předpisem L2, který udává, že má vždy přednost letoun přistávající. V tomto experimentu bylo toto vstupní pravidlo stroje nahrazeno pravidlem LEAST FREE, které zapřičiňuje nejprve výběr součástí ze zásobníku, u kterého je jeho kapacita zaplněna více, poté odebírá z méně vytíženého zásobníku. Na Obrázku č. 25 vidíme sledovanou charakteristiku *EW* za použití vstupního pravidla PULL. Je patrné, že průměrná doba čekání je mnohonásobně delší v případě vzletu. Můžeme to

odůvodnit tím, že přednost má vždy letoun přistávající, až po přistání může další letoun vzlétnout. Na Obrázek č. 26 vidíme sledovanou charakteristiku EW za použití vstupního pravidla LEAST FREE. Průměrná doba čekání na vzlet je poměrně vyrovnaná s průměrnou dobou čekání na přistání, ale hodnoty EW přistání dosahují hodnot od 69 do 167 minut. Není možné, aby letoun tak dlouhou dobu vyčkával nad letištěm určení, než mu bude umožněno přistání. Z toho plyne, že relevantních výsledků dosáhneme použitím vstupního pravidla PULL [18].



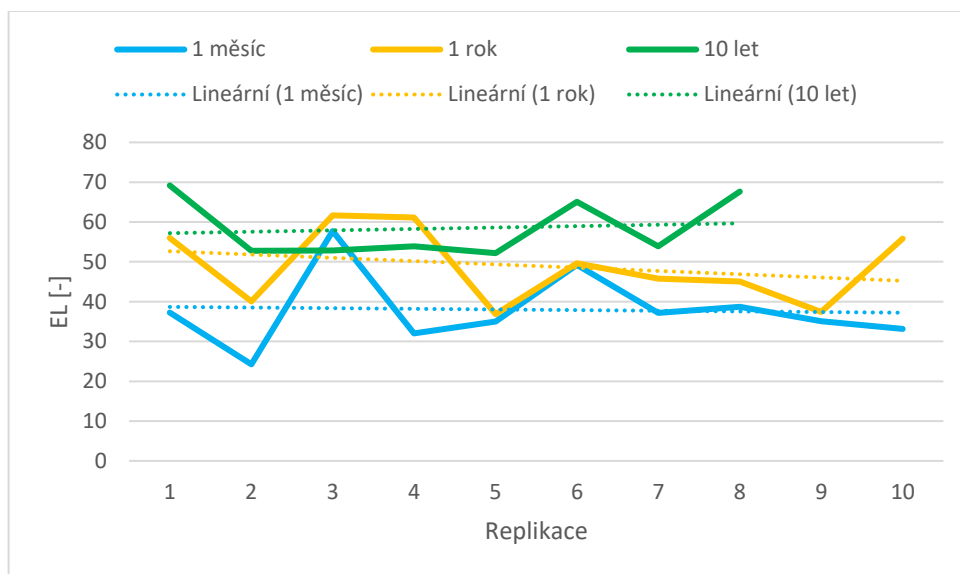
Obrázek č. 25 – Graf průměrné doby čekajících letounů, pravidlo PULL [autor]



Obrázek č. 26 – Graf průměrné doby čekajících letounů, pravidlo LEAST FREE [autor]

5.3 VÝVOJ PRŮMĚRNÉHO POČTU ČEKAJÍCÍCH LETOUNŮ V ČASE

Jako další experiment byl zvolen vývoj hodnot průměrného počtu čekajících letounů během simulačního času 1 měsíc, 1 rok a 10 let při intenzitě vstupního toku 21 letounů za hodinu. Jeho výsledky můžeme pozorovat na následujícím Obrázku č. 27 :



Obrázek č. 27 – Graf průměrného počtu čekajících letounů v čase [autor]

Při simulačním času 1 měsíc se výstupní hodnoty EL pohybovaly téměř okolo hodnoty 38 průměrně čekajících letounů. Při simulačním času 1 rok se hodnoty EL průměrně pohybovaly okolo hodnoty 49 čekajících letounů. Při poslední zvolené délce simulačního času tohoto experimentu 10 let se výstupní hodnoty EL pohybovaly okolo hodnoty 58 průměrně čekajících letounů. Nejnižších hodnot EL bylo dosaženo při druhé replikaci simulačního času 1 měsíc, tato hodnota činila průměrně 24 čekajících letounů. Nejvyšších hodnot EL bylo dosaženo při první replikaci simulačního času 10 let, hodnota činila průměrně 69 čekajících letounů na vzlet nebo přistání. Tento experiment potvrzuje skutečnost, že délka simulačního času 1 měsíc je pro intenzitu vstupního toku 21 letounů za hodinu malá.

6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo určit teoretickou kapacitu vzletové a přistávací dráhy pomocí experimentů v simulačním softwaru Witness. Výsledky těchto experimentů byly srovnány s výsledky, kterých dosáhl Ing. Matoušek ve své bakalářské práci obhajované v akademickém roce 2016/2017 [1].

Úvodní část práce byla věnována charakteristice vzletu a přistání. Dále byly zmíněny faktory, které mohou ovlivnit celý proces vzletu nebo přistání. Mezi tyto faktory můžeme zahrnout povrch vzletové a přistávací dráhy, rozstupy mezi letouny nebo také protisrážkový systém letounu.

V další kapitole byl popsán používaný simulační software Witness, byly zde popsány základní funkce a pravidla, jejichž znalost se dále využila při tvorbě modelu.

Ve čtvrté kapitole práce byla popsána tvorba simulačního modelu, nastavení jednotlivých součástí modelu. Také zde byly statisticky zpracovány data naměřená data, jejichž výsledky byly potřebné pro nastavení simulačních experimentů.

Pátá kapitola práce byla zaměřena na vyhodnocení výsledků plynoucích ze simulačních experimentů. Při intenzitě vstupního toku 1 až 20 letounů za hodinu hodnoty z bakalářské práce Ing. Matouška [1] odpovídaly vypočteným mezím z dat simulačních experimentů, při intenzitě vstupního toku 21 letounů za hodinu se hodnota nepohybovala v mezích simulačních experimentů. Rozdíl mezi výsledky z naměřených dat a výsledky ze simulačního experimentu byl téměř 22 čekajících letounů. Při výpočtech průměrné doby čekání na vzlet nebo přistání se hodnoty z naměřených dat téměř shodovaly s těmi vypočtenými z výstupních dat simulačních experimentů, a to u intenzity vstupního toku průměrně 1 až 20 letounů za hodinu. Při intenzitě průměrně 21 letounů za hodiny by dle simulačního modelu průměrná doba čekání dosahovala hodnoty 131 minut, zatímco u naměřených dat tomu bylo téměř 194 minut. Obě tyto hodnoty jsou velmi vychýlené od požadované povinné rezervy paliva letounu.

Teoretická kapacita vzletové a přistávací dráhy je přibližně 21 letounů za hodinu, ale pokud bychom brali v úvahu povinnou rezervu paliva, tato hodnota by mohla být v rozmezí cca 19 až 20 letounů za hodinu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MATOUŠEK, R. *Modelování zadaného leteckého procesu: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Technologie letecké dopravy, 2017
- [2] AIP. L 14, Hlava 2 [online]. [vid. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/index.htm>
- [3] *Airbus A380-800* [online]. 2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.flying-revue.cz/letadla-a380-800>
- [4] AIP. L 14, Dodatek A [online]. [vid. 2013-11-14]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/index.htm>
- [5] *Runway Surface Friction* [online]. 2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Runway_Surface_Friction
- [6] *Aquaplaning* [online]. 2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.skybrary.aero/index.php/Aquaplaning>
- [7] Transportation Association of Canada. *Illustration of the microtexture and macrotexture of the road surface* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-microtexture-and-macrotexture-of-the-road-surface-Source-TAC_fig2_290946751
- [8] Runway. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Runway>
- [9] KELLER, Ladislav. *Učebnice pilota 2016: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. Cheb: Svět křídel, 2016. ISBN 978-80-87567-89-0.
- [10] AIP. L4444, Hlava 5 [online]. [vid. 2017-06-22]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/index.htm>
- [11] *Airborne Collision Avoidance System (ACAS) guide* [online]. 2017 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/publication/airborne-collision-avoidance-system-acas-guide>

- [12] DORDA, M.; HRADIL, M.; MÝDLO, L. *Simulace technologických systémů a procesů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava/Univerzita Pardubice, 2012 [cit. 2020-05-18]. ISBN 978-80-248-3270-8. Dostupné z: https://issuu.com/michdor/docs/m15_text
- [13] LANNER GROUP. *WITNESS Training Reference Manual* [online]. 2009 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://studylib.net/doc/18364029/witness-training-reference-manual?fbclid=IwAR0YCN-mYoITadMPIslik3B_8KxL5H9RIY3z4Yvw--_KH9KAsEDxoBvgao
- [14] OTIPKA, P., ŠMAJSTRLA, V. *Statistický soubor s jedním argumentem. PRAVDĚPODOBNOST A STATISTIKA* [online]. [vid. 2017-01-27]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~oti73/cdpast1/>
- [15] *Střední chyba průměru: WikiSkripta* [online]. 2014 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Střední_chyba_průměru
- [16] DORDA, M. 3. část: *Teorie hromadné obsluhy. Kvantitativní metody organizace a řízení I* [online]. [vid. 2017-01-28]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Hromadna_obsluha_nova.pdf
- [17] AIP. *L6, Hlava 2* [online]. [vid. 2016-03-31]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-6/L-6ii/data/print/L-6-II_cely.pdf
- [18] AIP. *L2, Hlava 3* [online]. [vid. 2017-10-12]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-6/L-6ii/data/print/L-6-II_cely.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázky

Obrázek č. 1 – Vyhlášené provozní délky drah	13
Obrázek č. 2 – Makrotextura a mikrotextura povrchu.....	14
Obrázek č. 3 – Fáze vzletu.....	15
Obrázek č. 4 – Fáze přistání.....	16
Obrázek č. 5 – 1 minutový rozstup mezi odlétávajícími letouny	18
Obrázek č. 6 – 2 minutový rozstup mezi odlétávajícími letouny	19
Obrázek č. 7 – 5 minutový rozstup mezi odlétávajícími letouny	19
Obrázek č. 8 - Časové rozmezí TCAS	20
Obrázek č. 9 - Signalizace TCAS	21
Obrázek č. 10 – Pracovní plocha softwaru Witness	23
Obrázek č. 11 – Nastavení součásti	25
Obrázek č. 12 – Nastavení zásobníku	25
Obrázek č. 13 – Nastavení stroje	27
Obrázek č. 14 – Rozvržení prvků	30
Obrázek č. 15 – Nastavení prvku Letoun_pristani	31
Obrázek č. 16 – Nastavení prvku cekajici_na_pristani.....	32
Obrázek č. 17 – Nastavení prvku Draha	33
Obrázek č. 18 – Simulační model.....	34
Obrázek č. 19 – Simulační model s pomocnými proměnnými.....	35
Obrázek č. 20 - Graf rozdělení souboru do tříd pro vzlet.....	39
Obrázek č. 21 - Graf rozdělení souboru do tříd pro přistání.....	42
Obrázek č. 22 - Graf použití WARMUP periody při intenzitě vstupního toku 1 letoun za hodinu	47

Obrázek č. 23 – Graf použití WARMUP periody při intenzitě vstupního toku 10 letounů za hodinu	48
Obrázek č. 24 - Graf použití WARMUP periody při intenzitě vstupního toku 21 letounů za hodinu	48
Obrázek č. 25 - Graf průměrné doby čekajících letounů, pravidlo PULL.....	49
Obrázek č. 26 - Graf průměrné doby čekajících letounů, pravidlo LEAST FREE	50
Obrázek č. 27 - Graf průměrného počtu čekajících letounů v čase	50

Tabulky

Tabulka 1 – Šířka vzletové a přistávací dráhy	12
Tabulka 2 – Základní prvky modelu.....	29
Tabulka 3 – Prvky simulačního modelu	34
Tabulka 4 – Plovoucí zápis do MS Excel	36
Tabulka 5 – Časy vzletu.....	37
Tabulka 6 – Analýza dat vzletu	38
Tabulka 7 – Rozdělení souboru do tříd pro vzlet.....	39
Tabulka 8 – Časy přistání	40
Tabulka 9 – Analýza dat přistání	41
Tabulka 10 - Rozdělení souboru do tříd pro přistání	42
Tabulka 11 – Střední hodnota EX.....	43
Tabulka 12 - Porovnání průměrného počtu čekajících letounů ve frontě.....	45
Tabulka 13 – Vývoj EL v čase.....	46
Tabulka 14 – Porovnání průměrné doby čekání ve frontě.....	46

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Simulační model vzletu a přistání (pouze elektronicky)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Michalu Dordovi, Ph.D. za trpělivost a ochotu, odborné rady a doporučení během konzultací při tvorbě této bakalářské práce.

Také bych chtěla poděkovat doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za jeho rady v rámci prezentace postupu bakalářské práce.